

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**RICARDO COELHO DE SOUSA**

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE SETE MÉTODOS NUMÉRICOS  
UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE  
WEIBULL APLICADOS AOS DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO  
COLETADOS NA CIDADE DE PARACURU E CAMOCIM-CE**

**Fortaleza  
2011**

RICARDO COELHO DE SOUSA

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE SETE MÉTODOS NUMÉRICOS  
UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE  
WEIBULL APLICADOS AOS DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO  
COLETADOS NA CIDADE DE PARACURU E CAMOCIM-CE**

Dissertação apresentada à coordenação do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Ceará, com área de concentração em Energias Renováveis, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha –  
UFC

Co-Orientador: Prof<sup>a</sup> Maria Eugênia Vieira da Silva Ph.D -  
UFC

**Fortaleza  
2011**

S698a Sousa, Ricardo Coelho

Análise e comparação de sete métodos numéricos utilizados na determinação dos parâmetros da curva de Weibull aplicados aos dados de velocidade do vento coletados na cidade de Paracuru e Camocim -CE / Ricardo Coelho Sousa, 2011.

84 f. ; Il. Color. enc.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha

Co-orientadora: Profa. Dra. Maria Eugênia Vieira da Silva

Área de concentração: Energias renováveis

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Fortaleza, 2011.

1. Engenharia mecânica. 2. Análise numérica. 3. Energia eólica.

I. Rocha, Paulo Alexandre Costa. (orient.) II. Silva, Maria Eugênia Vieira da (co - orient.). III. Universidade Federal do Ceará – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD 620.1

RICARDO COELHO DE SOUSA

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE SETE MÉTODOS NUMÉRICOS UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE WEIBULL APLICADOS AOS DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO COLETADOS NA CIDADE DE PARACURU E CAMOCIM-CE**

Dissertação apresentada à coordenação do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Ceará, com área de concentração em Energias Renováveis, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof<sup>ª</sup>. Maria Eugênia Vieira da Silva Ph.D (Co-orientadora)  
Universidade Federal do Ceará

---

Prof. Dr. João Welliandre Carneiro Alexandre  
Universidade Federal do Ceará

Dedico este trabalho à minha esposa, Maria de Fátima e às minhas filhas, Samara e Samira, pelo apoio e entendimento das razões de minha ausência familiar durante a realização desta dissertação de mestrado.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e da sapiência e por ter me possibilitado a realização deste trabalho,

Ao prof. Paulo Alexandre pelas orientações recebidas, dedicação e pela rapidez nas respostas que sempre me deu durante a elaboração desta dissertação,

Ao prof. William Barcellos pelo apoio, dedicação e incentivo durante a realização das disciplinas teóricas do curso de mestrado,

Ao colega Jefferson Lemos pelo apoio recebido e pelas dúvidas tiradas durante a realização deste trabalho.

Aos engenheiros Raimundo Lutif, Antônio Estácio e o Sr. Aloísio Arruda da Companhia de Gás do Ceará (Cegás), pela liberação de horário concedida durante a realização das disciplinas teóricas do curso.

Às senhoras Nilce Quinderé e Eliane Santana da Companhia de Gás do Ceará (Cegás) pela intermediação junto à SEINFRA, onde foi possível a liberação dos dados utilizados nesta dissertação.

À Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará, pela liberação dos dados utilizados neste trabalho.

Aos professores André Bueno, Francisco Ilson, Francisco Nivaldo e Maria Eugênia pelos conhecimentos recebidos durante a realização deste curso de mestrado.

Aos colegas de curso, Anderson, Danilo, Samuel, Francisco e Alberto pela amizade e apoio recebidos.

À minha família, esposa, filhas e meus pais, pelo amor sempre recebido de todos.

Ao Sr. Robson Dantas da Embrapa Tabuleiros Costeiros, pelo apoio e incentivo recebido.

“Peça a Deus que abençoe os teus planos e eles darão certo”.

(Provérbios 16:3)

## RESUMO

Esta dissertação de mestrado trata da análise e comparação de 7 (sete) métodos numéricos: Método Gráfico, Método da Máxima Verossimilhança, Método da Máxima Verossimilhança Modificado, Método Empírico, Método do Momento, Método da Energia Padrão e Método da Energia Equivalente, para avaliação da eficiência na determinação dos parâmetros para a distribuição de Weibull, através de dados de velocidade de vento coletados nas cidades de Paracuru-Ce e Camocim-Ce, no período compreendido entre agosto de 2004 a abril de 2006, obtidos junto à Secretaria de Infraestrutura do Ceará (SEINFRA-CE). Foram utilizadas as metodologias de análise de variância, a raiz quadrada dos erros quadráticos médios, teste do qui-quadrado e da análise da potência, para comparação dos métodos propostos. Este trabalho visou à determinação de qual método fora o mais eficiente na determinação dos parâmetros da curva de distribuição de Weibull para os dados disponíveis, objetivando se estabelecer critérios para melhor aproveitamento do potencial eólico do estado do Ceará, que tem ocupado posição de destaque nacional na utilização de fontes renováveis para geração de energia elétrica.

Palavras Chave: distribuição de Weibull, energia eólica, métodos numéricos, eficiência e aproveitamento energético



## ABSTRACT

This dissertation deals with the analysis and comparison of 7 (seven), numerical methods: Graphical Method, Maximum Likelihood Method, Modified Maximum Likelihood Method, Empirical Method, Moment Method, Energy Pattern Method and Equivalent Energy Method, for the assessment of effectiveness in determining the parameters for the Weibull distribution, using wind speed data collected in Camocim and Paracuru cities, in the period from August 2004 to April 2006, obtained by the Department of Infrastructure of the Ceará state. Using the methods of analysis of variance, RMSE test, chi-square test and analysis of power to compare the proposed methods, this study aimed to determine which method was most effective in determining the shape parameters of Weibull distribution for the available data, aiming to establish criteria to a better utilization of wind power in the Ceará state, which is in national prominence in the use of renewable sources for electricity generation.

Keywords: Weibull distribution, wind energy, numerical methods, energy efficiency and utilization

## LISTA DE FIGURAS

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pg.</b>
Figura 1	Oferta nacional interna de energia elétrica por fonte de geração	01
Figura 2	Distribuição diária da velocidade do vento no Ceará	03
Figura 3	Modelo gráfico da distribuição de Weibull Para Diferentes Valores de K	06
Figura 4	Modelo Método Gráfico	08
Figura 5	Localização dos Anemômetros/sensores direção de Paracuru	19
Figura 6	Localização dos Anemômetros/sensores direção de Camocim	19
Figura 7	Etapas de condicionamento e validação	20
Figura 8	Distribuição de Weibull – Camocim Agosto de 2004	27
Figura 9	Distribuição de Weibull – Camocim Setembro de 2004	28
Figura 10	Distribuição de Weibull – Camocim Outubro de 2004	29
Figura 11	Distribuição de Weibull – Camocim Novembro de 2004	30
Figura 12	Distribuição de Weibull – Camocim Dezembro de 2004	31
Figura 13	Distribuição de Weibull – Paracuru Agosto de 2004	32
Figura 14	Distribuição de Weibull – Paracuru Setembro de 2004	33
Figura 15	Distribuição de Weibull – Paracuru Outubro de 2004	34
Figura 16	Distribuição de Weibull – Paracuru Novembro de 2004	35
Figura 17	Distribuição de Weibull – Paracuru Dezembro de 2004	36
Figura 18	Distribuição de Weibull – Camocim Janeiro de 2005	38
Figura 19	Distribuição de Weibull – Camocim Fevereiro de 2005	39
Figura 20	Distribuição de Weibull – Camocim Março de 2005	40
Figura 21	Distribuição de Weibull – Camocim Abril de 2005	41
Figura 22	Distribuição de Weibull – Camocim Maio de 2005	42
Figura 23	Distribuição de Weibull – Camocim Junho de 2005	43
Figura 24	Distribuição de Weibull – Camocim Julho de 2005	44
Figura 25	Distribuição de Weibull – Camocim Agosto de 2005	45
Figura 26	Distribuição de Weibull – Camocim Setembro de 2005	45
Figura 27	Distribuição de Weibull – Camocim Outubro de 2005	47

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pg.</b>
Figura 28	Distribuição de Weibull – Camocim Novembro de 2005	48
Figura 29	Distribuição de Weibull – Camocim Dezembro de 2005	49
Figura 30	Distribuição de Weibull – Paracuru Janeiro de 2005	50
Figura 31	Distribuição de Weibull – Paracuru Fevereiro de 2005	51
Figura 32	Distribuição de Weibull – Paracuru Março de 2005	52
Figura 33	Distribuição de Weibull – Paracuru Abril de 2005	53
Figura 34	Distribuição de Weibull – Paracuru Maio de 2005	54
Figura 35	Distribuição de Weibull – Paracuru Junho de 2005	55
Figura 36	Distribuição de Weibull – Paracuru Julho de 2005	56
Figura 37	Distribuição de Weibull – Paracuru Agosto de 2005	57
Figura 38	Distribuição de Weibull – Paracuru Outubro de 2005	58
Figura 39	Distribuição de Weibull – Paracuru Novembro de 2005	59
Figura 40	Distribuição de Weibull – Paracuru Dezembro de 2005	60
Figura 41	Distribuição de Weibull – Camocim Janeiro de 2006	61
Figura 42	Distribuição de Weibull – Camocim Fevereiro de 2006	62
Figura 43	Distribuição de Weibull – Camocim Março de 2006	63
Figura 44	Distribuição de Weibull – Camocim Abril de 2006	64
Figura 45	Distribuição de Weibull – Paracuru Janeiro de 2006	65
Figura 46	Distribuição de Weibull – Paracuru Fevereiro de 2006	66
Figura 47	Distribuição de Weibull – Paracuru Março de 2006	67
Figura 48	Distribuição de Weibull – Paracuru Abril de 2006	68
Figura 49	Distribuição de Weibull – Camocim Ano 2004	70
Figura 50	Distribuição de Weibull – Paracuru Ano 2004	71
Figura 51	Distribuição de Weibull – Camocim Ano 2005	72
Figura 52	Distribuição de Weibull – Paracuru Ano 2005	73
Figura 53	Distribuição de Weibull – Camocim Ano 2006	75
Figura 54	Distribuição de Weibull – Paracuru Ano 2006	76

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>UN</b>
$f(v)$	Função da distribuição relativa de Weibull	-
$F(v)$	Função da distribuição cumulativa de Weibull	-
$K$	Parâmetro de Forma da distribuição de Weibull	-
$C$	Parâmetro de Escala da Distribuição de Weibull	m/s
$V$	Velocidade do vento	m/s
$E_{pf}$	Fator da energia padrão	-
$v^3$	Cubo da velocidade do vento	m/s
$N$	Número de intervalos	-
$v_i$	Velocidade do vento no intervalo $i$	m/s
$W_{v_i}$	Freqüência de ocorrência da velocidade do vento	-
$\chi^2$	Teste qui-quadrado	-
$RMSE$	Raiz quadrada dos erros quadráticos médios	-
$EF$	Eficiência do método	-
$R^2$	Análise de Variância	-
$Pd_{ts}$	Serie temporal da densidade de potência	-
$E_w$	Potência de Weibull	KWh/m <sup>2</sup>
$E_a$	Potência Experimental	KWh/m <sup>2</sup>
$T$	Tempo	s
$V_{máx}$	Velocidade máxima observada	m/s
$B$	Incremento do Histograma de velocidade	-
$V_m$	Velocidade média do vento	m/s
$\Gamma$	Função gamma	-
$\rho$	Densidade do ar	Kg/m <sup>3</sup>
$\epsilon_{vi}$	Soma dos quadrados dos erros	-
$\Sigma$	Desvio padrão das velocidades do vento observadas	-

**LISTA DE TABELAS**

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pg.</b>
Tabela 1	Fluxo de crescimento anual de energia elétrica	02
Tabela 2	Média e Desvio Padrão da Velocidade do Vento	21
Tabela 3	Modelo Planilha Eletrônica com Velocidade Média em Diferentes Alturas	23
Tabela 4	Quantidade de Curvas Geradas por Período de Coleta de Dados	25
Tabela 5	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Agosto de 2004	28
Tabela 6	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Setembro de 2004	29
Tabela 7	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Outubro de 2004	30
Tabela 8	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Novembro de 2004	31
Tabela 9	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Dezembro de 2004	32
Tabela 10	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Agosto de 2004	33
Tabela 11	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Setembro de 2004	34
Tabela 12	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Outubro de 2004	35
Tabela 13	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Novembro de 2004	36
Tabela 14	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Dezembro de 2004	37
Tabela 15	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Janeiro de 2005	38
Tabela 16	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Fevereiro de 200	39

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pg.</b>
Tabela 17	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Março de 2005	40
Tabela 18	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Abril de 2005	41
Tabela 19	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Maio de 2005	42
Tabela 20	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Junho de 2005	43
Tabela 21	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Julho de 2005	44
Tabela 22	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Agosto de 2005	45
Tabela 23	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Setembro de 2005	46
Tabela 24	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Outubro de 2005	47
Tabela 25	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Novembro de 2005	48
Tabela 26	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Dezembro de 2005	49
Tabela 27	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Janeiro de 2005	50
Tabela 28	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Fevereiro de 2005	51
Tabela 29	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Março de 2005	52
Tabela 30	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Abril de 2005	53
Tabela 31	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Maio de 2005	54
Tabela 32	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Junho de 2005	55

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pg.</b>
Tabela 33	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Julho de 2005	56
Tabela 34	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Agosto de 2005	57
Tabela 35	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Outubro de 2005	58
Tabela 36	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Novembro de 2005	59
Tabela 37	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Dezembro de 2005	60
Tabela 38	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Janeiro de 2006	62
Tabela 39	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Fevereiro de 2006	63
Tabela 40	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Março de 2006	64
Tabela 41	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Abril de 2006	65
Tabela 42	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Janeiro de 2006	66
Tabela 43	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Fevereiro de 2006	67
Tabela 44	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Março de 2006	68
Tabela 45	Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Abril de 2006	69
Tabela 46	Análise Estatística e Análise da Potência – Camocim Ano 2004	70
Tabela 47	Análise Estatística e Análise da Potência – Paracuru Ano 2004	71
Tabela 48	Análise Estatística e Análise da Potência – Camocim Ano 2005	73

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>	<b>Pg.</b>
Tabela 49	Análise Estatística e Análise da Potência – Paracuru Ano 2005	74
Tabela 50	Análise Estatística e Análise da Potência – Camocim Ano 2006	75
Tabela 51	Análise Estatística e Análise da Potência – Paracuru Ano 2006	76



## SUMÁRIO

	Pg.
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
1.1. Justificativa	<b>03</b>
1.2. Objetivos	<b>04</b>
1.3. Estruturação dos Capítulos	<b>04</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>05</b>
2.1. Distribuição de Weibull e os Parâmetros k e c	<b>05</b>
2.2. Métodos Numéricos Para Estimar os Parâmetros da Distribuição de Weibull	<b>07</b>
2.2.1 Método Gráfico	<b>07</b>
2.2.2 Método da Máxima Verossimilhança	<b>08</b>
2.2.3 Método da Máxima Verossimilhança Modificado	<b>09</b>
2.2.4 Método da energia Padrão	<b>09</b>
2.2.5 Método do Momento	<b>10</b>
2.2.6 Método Empírico	<b>11</b>
2.2.7 Método da Energia Equivalente	<b>11</b>
2.3. Análise Estatística dos Métodos Propostos Para Estimar os Parâmetros de Weibull	<b>12</b>
2.3.1 Teste do Qui-Quadrado	<b>12</b>
2.3.2 Teste RMSE	<b>13</b>
2.3.3 Análise de Variância	<b>14</b>
2.4. Análise Física dos Métodos Propostos Para Estimar os Parâmetros de Weibull	<b>14</b>
2.5. Publicações Relacionadas	<b>15</b>
<b>3. DADOS DA SEINFRA-CE</b>	<b>17</b>
3.1. Direção dos Ventos	<b>17</b>
3.2. Coleta de Dados	<b>18</b>
3.3. Validação e Condicionamento dos Dados	<b>20</b>
3.4. Instrumentação	<b>20</b>
3.5. Velocidade Média e Desvio Padrão da Velocidade do Vento	<b>21</b>
<b>4. METODOLOGIA DA PESQUISA</b>	<b>22</b>
4.1. Ferramentas Utilizadas Para Solução dos Métodos Numéricos	<b>22</b>

4.2. Valores Esperados Para os Parâmetros Estatísticos de Análise dos Métodos Numéricos	23
4.3. Comparação dos Parâmetros $k$ e $c$ Para Cada Método Numérico	24
4.4. Valores Estimados de $k$ e $c$	25
4.5. Análise Estatística e Análise Física da Distribuição de Weibull	26
<b>5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>26</b>
5.1. Curvas e Tabelas Mensais – 2004	27
5.1.1 Distribuição de Weibull – Camocim 2004	27
5.1.2 Distribuição de Weibull – Paracuru 2004	32
5.2. Curvas e Tabelas Mensais - 2005	37
5.2.1 Distribuição de Weibull – Camocim 2005	37
5.2.2 Distribuição de Weibull – Paracuru 2005	49
5.3. Curvas e Tabelas Mensais - 2006	61
5.3.1 Distribuição de Weibull – Camocim 2006	61
5.3.2 Distribuição de Weibull – Paracuru 2006	65
5.4. Curvas e Tabelas Anuais - 2004	69
5.4.1 Distribuição de Weibull – Camocim 2004	69
5.4.2 Distribuição de Weibull – Paracuru 2004	70
5.5. Curvas e Tabelas Anuais - 2005	72
5.5.1 Distribuição de Weibull – Camocim 2005	72
5.5.2 Distribuição de Weibull – Paracuru 2005	73
5.6. Curvas e Tabelas Anuais – 2006	74
5.6.1 Distribuição de Weibull – Camocim 2006	74
5.6.2 Distribuição de Weibull – Paracuru 2006	75
5.7. Comentários dos Resultados	77
5.7.1 Análise Estatística	77
5.7.2 Análise Física	78
5.7.3 Análise dos Valores de $k$ e $c$	78
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>79</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>80</b>
<b>8. ANEXOS – Conceitos Estatísticos</b>	<b>82</b>



## 1. INTRODUÇÃO

A energia eólica já é utilizada há cerca de 3.000 anos. Na era moderna, no início do século XX, o homem utilizava a força dos ventos para bombear água e moer grãos. Atualmente, com o advento da necessidade de se desenvolver novas fontes de energia que garantam o desenvolvimento econômico com sustentabilidade e com pouco ou nenhum impacto ambiental, têm-se aumentado cada vez mais o uso de fontes de energias renováveis, dentre elas a energia eólica, que é uma fonte limpa e praticamente inesgotável. A utilização de energia eólica nos dias de hoje se dá quase de forma exclusiva para geração de energia elétrica. Esta aplicação vem crescendo a cada dia, principalmente em regiões propícias a esta fonte de energia, como é o caso da região nordeste brasileira, mais precisamente o litoral do estado do Ceará. Segundo dados do Ministério de Minas de Energia, através do Balanço Energético Nacional (BEN 2010), a energia eólica representa 0,2% da geração total de energia elétrica nacional, sendo o restante proveniente de outras fontes energéticas, conforme se pode observar no gráfico apresentado na Figura 1:

Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte – BEN 2010

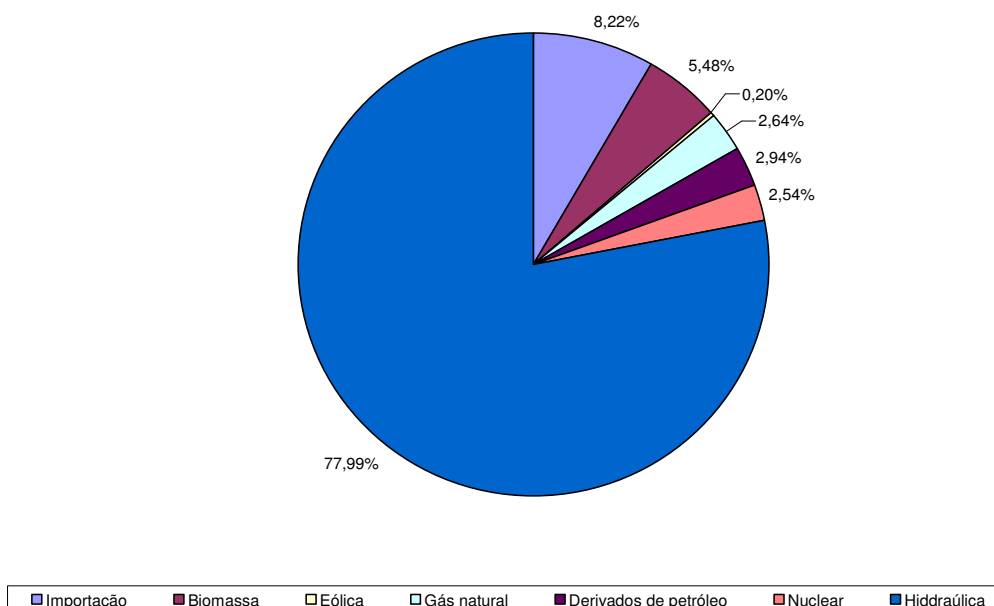


Figura 1 – Oferta nacional interna de energia elétrica por fonte de geração

Ainda segundo os dados do BEN 2010, desta parcela de geração de energia elétrica a partir da energia eólica, o estado do Ceará representa 51,5% de toda produção nacional. A partir da Tabela 1 observa-se que a utilização da energia eólica no País vem tendo um crescimento bastante acentuado na última década.

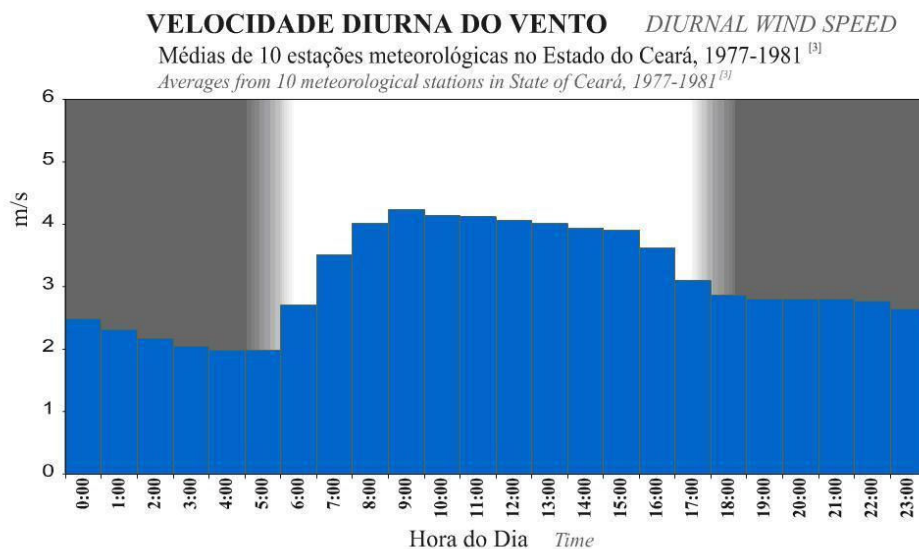
**Tabela 1 – Fluxo de crescimento anual de energia elétrica**

	Ano / GWh									
<b>FLUXO ANUAL</b>	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<b>GERAÇÃO TOT</b>	53	53	56	63	74	74	342	668	1183	1238
<b>CONSUMO TOT</b>	53	53	56	63	74	74	342	668	1183	1238

**Fonte: Empresa de Pesquisa Energética - BEN 2010**

Com área territorial de 147.348 km<sup>2</sup> e situado no Nordeste do Brasil, o estado do Ceará está imerso na contínua circulação atmosférica subequatorial dos ventos alísios, intensificados pelas brisas marinhas ao longo de 640km de seu perímetro litorâneo com o Oceano Atlântico. Os ventos sobre o Ceará são mais intensos durante o dia, conforme mostra a Figura 2, que apresenta as médias de velocidade do vento ao longo das horas do dia, em 10 estações meteorológicas distribuídas pelo Estado, no período 1977-1981. Este fato reflete a origem solar dos ventos, pelo aquecimento desigual da superfície da Terra. Uma exceção em relação a este comportamento diurno pode ser identificada nas áreas de serra, devido a influências locais de mesoescala. (SEINFRA-CE, 2008).

Com ventos praticamente constantes o ano todo e com o grande incentivo financeiro que o estado do Ceará tem recebido atualmente, as regiões litorâneas do estado passam a ser oportunas na exploração e instalação de novas usinas eólicas, captando cada vez mais investidores que estão apostando na utilização da energia eólica como fonte de geração de energia elétrica.



**Figura 2 – Distribuição diária da velocidade do vento no Ceará (Atlas Potencial Eólico do Ceará, 2008)**

Para se ter uma avaliação do potencial eólico do estado, faz-se necessário realizar longas observações meteorológicas na região em estudo. Dentre estas observações, tem-se a velocidade do vento, que é uma variável aleatória e que dela dependem os resultados mais precisos sobre o potencial energético do local. A velocidade do vento em um determinado período pode ser representada através de uma função de densidade de probabilidades. Nos últimos anos a distribuição de Weibull tem sido um dos métodos mais utilizados e recomendados para se determinar o potencial de energia eólica, além de ser usado como referência para estimar a energia eólica comercialmente viável.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho mostra relevância para o estado do Ceará, possibilitando um maior e melhor aproveitamento do potencial eólico, colocando o Ceará como destaque nacional na utilização de fontes de energias limpas para a geração de energia elétrica. Visto não existir estudos realizados para se determinar o perfil de distribuição de ventos na região, este trabalho possibilita a determinação da melhor metodologia a ser aplicada para se estimar a potência eólica do estado.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo avaliar e comparar sete métodos numéricos, já descritos na literatura, para o ajuste da distribuição de Weibull das velocidades de vento no litoral do Ceará, mais precisamente nas cidades de Camocim e Paracuru, com dados anemométricos coletados nestas áreas no período compreendido entre os anos de 2004 a 2006. Foi usada tanto uma base anual como mensal.

Através dos levantamentos de dados anemométricos e estudos realizados pela Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA), a realização do objetivo deste trabalho passa necessariamente pelos seguintes objetivos específicos:

- Levantamento e organização dos dados de acordo com o formato necessário para processamento;
- Aplicação de cada um dos métodos de ajuste da curva de Weibull para cada localidade, tanto em base mensal como anual;
- Comparação da potência prevista pelos dados ajustados com a dos experimentais, para determinação da melhor metodologia de ajuste.

## 1.3 ESTRUTURAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Este tópico tem por finalidade mostrar ao leitor a estrutura e organização desta dissertação, facilitando a leitura e uma melhor compressão dos itens abordados neste trabalho.

No Capítulo 2 são mostradas as fundamentações teóricas utilizadas para elaboração deste trabalho, descrevendo as principais publicações sobre o assunto, além da descrição de cada método numérico que foi aplicado nesta dissertação. No Capítulo 3 são apresentados os dados coletados pela SEINFRA, mostrando a metodologia de coleta, a metodologia de validação dos dados, além de detalhes de posicionamento e instalação dos anemômetros e

das torres e suas respectivas localizações. No Capítulo 4 é apresentada a metodologia de pesquisa. No Capítulo 5 são apresentados os resultados, mostrando as curvas e tabelas mensais e anuais para os métodos numéricos abordados neste trabalho para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull, além das discussões a respeito dos resultados obtidos.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, a partir dos resultados apresentados. No Capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas como base para a elaboração desta dissertação de mestrado. Finalizando a dissertação, o Anexo 1 traz uma revisão de conceitos estatísticos com os quais foram feitas as análises estatísticas para se chegar as conclusões da dissertação.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 A Distribuição de Weibull e os Parâmetros $k$ e $c$**

A velocidade do vento é uma variável aleatória e para se determinar o potencial eólico de uma região é necessária a utilização de análises estatísticas. Para isto é preciso à existência de séries temporais com os registros da velocidade do vento, estes registros são os dados anemométricos. A base de dados anemométricos das cidades de Paracuru-Ce e Camocim-CE foi levantada pela Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará - SEINFRA, no período compreendido entre 18/08/2004 à 09/05/2006 (SEINFRA, 2010).

Weibull (1952) propôs uma distribuição para descrever a vida útil de materiais e equipamentos sujeitos a esforços de fadiga e cargas que poderiam provocar a fratura dos mesmos. A teoria de Weibull utiliza a abordagem do componente mais frágil para determinar a resistência mecânica dos materiais, onde a resistência do elo mais frágil determina a resistência para os materiais e equipamentos pertencentes à mesma cadeia. Conseqüentemente, o valor medido será o valor mínimo a partir de um conjunto de valores possíveis (GROSH, 1999). Se os testes são repetidos outros valores mínimos serão novamente medidos, portanto a resistência medida pode ser considerada uma variação da função de densidade de probabilidade de Weibull.

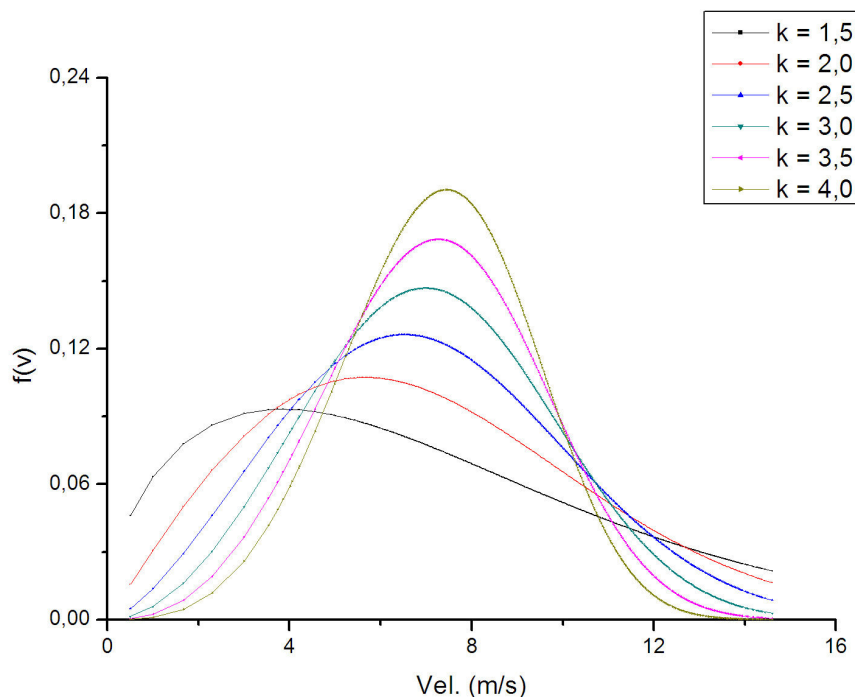


Tomando como base a velocidade do vento, a distribuição de Weibull pode ser descrita como uma função de densidade de probabilidade  $f(v)$  e uma função cumulativa da distribuição  $F(v)$  e pode ser determinada através das equações:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Onde  $v$  é a velocidade do vento medida em m/s,  $k$  é um parâmetro adimensional, chamado de parâmetro de forma e  $c$  é considerado um parâmetro de escala, também medido em m/s. A medida que  $k$  assume valores diferentes, outras distribuições vão sendo definidas, como por exemplo  $k = 1,5$  temos uma distribuição exponencial, quando  $k = 2$  esta distribuição passa a ser chamada de Rayleigh. A Figura 4 mostra a função de densidade de probabilidade para diferentes valores do parâmetro de forma.



**Figura 3 - Distribuição de Weibull Para Diferentes Parâmetros de forma  $k$**

Valores maiores de  $k$  indicam maior constância dos ventos, com menor ocorrência de valores extremos. Em geral, nas distribuições anuais da

velocidade do vento o parâmetro  $k$  situa-se entre 2 e 3. Excepcionalmente, o parâmetro  $k$  da distribuição mensal da velocidade do vento pode atingir valores superiores a 6 em regiões de ventos alísios, como no Nordeste brasileiro (PESSANHA, 2009). Por sua vez, o fator de escala  $c$  tem relação com a velocidade média.

Os parâmetros de forma  $k$  e de escala  $c$  podem ser estimados por diversos métodos. Neste trabalho são abordados o Método gráfico, Método empírico, Método do momento, Método da energia padrão, Método da máxima verossimilhança, Método da máxima verossimilhança modificado e Método da energia equivalente, sendo analisados e comparados para se definir qual melhor método para se estimar os parâmetros de Weibull.

## **2.2 Métodos Numéricos para Estimar os Parâmetros da Distribuição de Weibull**

Vários métodos numéricos têm sido estudados e utilizados para se determinar os parâmetros da distribuição de Weibull, com a finalidade de se obter uma distribuição de frequência das velocidades do vento. Desta maneira se pode avaliar e estimar a melhor forma de captação da energia eólica em diversas regiões do país e do mundo. Dentre estes métodos, podem ser citados os seguintes:

### **2.2.1 Método Gráfico**

O Método gráfico, que é obtido por meio da função de distribuição cumulativa. Neste método de distribuição, os dados de velocidade do vento são interpolados por uma linha reta, utilizando o conceito dos mínimos quadrados. A equação para este método pode ser representada através de uma dupla transformação logarítmica, conforme segue abaixo (CHANG, 2011)

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k \cdot \ln(v) - k \ln(c) \quad (3)$$

Este método é derivado do método dos mínimos quadrados de Gauss, onde os parâmetros de forma e de escala são determinados através de uma regressão linear conforme se pode observar na Figura 4. Neste caso o valor de  $k$  é igual ao coeficiente angular da reta de tendência dos dados e o parâmetro  $c$  é calculado fazendo o valor de  $y$  função igual a zero, sendo um método rápido e fácil para se determinar os parâmetros da distribuição de Weibull.

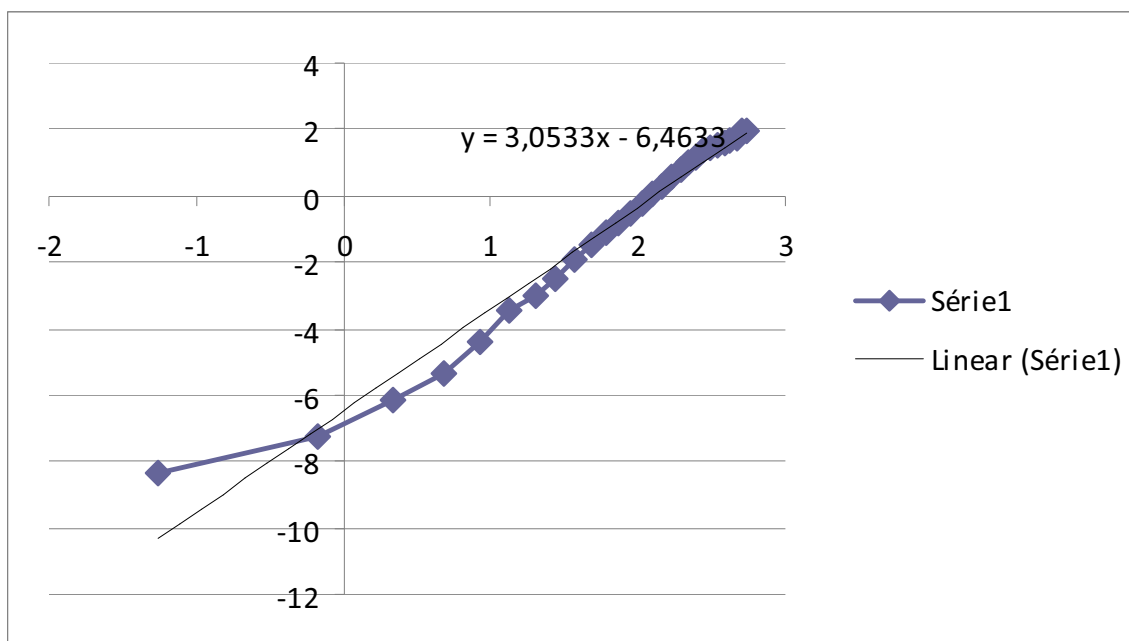


Figura 4 – Método Gráfico

### 2.2.2 Método da Máxima Verossimilhança

O Conceito básico da máxima verossimilhança foi proposto inicialmente por Fisher (1915), onde se aceitava que, se existem diferentes parâmetros, estes parâmetros podem gerar diferentes amostras, então dependendo da amostra selecionada, determinava-se qual seria o parâmetro mais provável para esta amostra.

O Método da máxima verossimilhança aplicado à velocidade do vento foi proposto por Stevens e Smulders (1979), e por tratar-se de um método de difícil solução, são necessárias iterações numéricas para a determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull. Neste método os valores de  $k$  e  $c$  são determinados por:

$$k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (4)$$

$$c = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (5)$$

Onde  $v_i$  representa o valor da velocidade do vento medido em cada intervalo de tempo  $i$ , e  $n$  é número de observações realizadas

### 2.2.3 Método da Máxima Verossimilhança Modificado

Este método somente pode ser considerado se os dados disponíveis de velocidade do vento já estiverem no formato da distribuição de Weibull e como no caso do método da máxima verossimilhança, necessita de iterações numéricas para a solução das equações, onde os parâmetros de Weibull são calculados por (CHANG, 2011):

$$k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i) f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$c = \left( \frac{1}{f(v \geq 0)} \sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i) \right)^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

Onde  $f(v_i)$  é a frequência relativa da velocidade do vento no intervalo  $i$ ,  $v_i$  é a velocidade do vento medida no mesmo intervalo  $i$  e  $n$  é o número de observações, sendo  $f(v \geq 0)$  a probabilidade da velocidade do vento ser maior ou igual a zero.

### 2.2.4 Método da Energia Padrão

Método da energia padrão. Este método (AKDAG, 2009) é relacionado à média dos dados da velocidade do vento e é definido conforme as equações a seguir:

$$E_{pf} = \frac{\bar{v}^3}{(\bar{v})^3} \quad (8)$$

$$k = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (9)$$

$$\bar{v} = c\Gamma(1 + 1/k) \quad (10)$$

Onde  $E_{pf}$  é chamado de fator padrão de energia e está relacionado com a razão entre a velocidade cúbica média ( $\bar{v}^3$ ) e a velocidade média ao cubo ( $(\bar{v})^3$ ),  $\Gamma$  é a função gama e é definida por:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (11)$$

### 2.2.5 Método do Momento

O método do momento foi sugerido por JUSTUS (1978). Este pode ser utilizado quando a média e o desvio padrão dos dados de velocidade do vento estão em escala disponível. Baseia-se em iterações numéricas das duas equações apresentadas abaixo:

$$\bar{v} = c\Gamma(1 + 1/k) \quad (12)$$

$$\sigma = c[\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k)]^{1/2} \quad (13)$$

Onde:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (14)$$

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

Neste caso  $\bar{v}$  e  $\sigma$  são respectivamente a velocidade média e o desvio padrão dos dados da velocidade do vento.

Este método foi desenvolvido como uma opção ao método da máxima verossimilhança, por ser de mais fácil solução. Uma vez conhecidos os valores de velocidade média e desvio padrão, os valores de  $k$  e  $c$  são calculados com maior facilidade e rapidez. A idéia principal deste método é trazer o momento populacional para próximo do momento amostral, através de estimadores estatísticos.

### 2.2.6 Método Empírico

O Método empírico (CHANG, 2011) é considerado um caso especial do método do momento, onde o parâmetro  $k$  e  $c$  de Weibull são descritos assim:

$$k = \left( \frac{\sigma}{\bar{v}} \right)^{-1,086} \quad (16)$$

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (17)$$

Este método numérico é um método de fácil implementação, visto ser uma aplicação direta de fórmula, uma vez conhecidos a velocidade média e o desvio padrão dos dados coletados.

### 2.2.7 Método da Energia Equivalente

Método da energia equivalente foi proposto por Silva (2003), onde os parâmetros  $k$  e  $c$  são estimados a partir da equivalência da densidade de energia da curva teórica e da curva de observações, permitindo uma simplificação matemática que resulta numa equação de apenas um parâmetro,  $k$ , que pode ser resolvida através de um estimador de mínimos quadrados.

Nesta metodologia validada por Silva (2003), é sugerido que este é o melhor método para se aplicar às condições eólicas presentes na região nordeste brasileira, pois é adaptado para a região, além da vantagem de rapidez nos cálculos e da precisão de suas estimativas. Neste método os parâmetros de Weibull são determinados pelas equações:

$$\sum_{i=1}^n \left[ W_{v_i} - e^{-\frac{[(v_i-1)(\Gamma+3\Gamma/k)^{1/3}]^k}{(v_m^3)^{1/3}}} + e^{-\frac{[(v_i)(\Gamma+3\Gamma/k)^{1/3}]^k}{(v_m^3)^{1/3}}} \right]^2 = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{v_i})^2 \quad (18)$$

$$c = \left[ \frac{v_m^3}{\Gamma(1 + 3/k)} \right]^{1/3} \quad (19)$$

Onde  $W_{v_i}$  é a frequência de ocorrência de velocidade do vento,  $n$  é o número de intervalos e  $v_m^3$  é a velocidade cúbica das observações e  $\varepsilon_{v_i}$  é a soma dos erros de aproximação.

### 2.3 Análise Estatística dos Métodos Propostos Para Estimar os Parâmetros de Weibull

Vários testes estatísticos têm sido utilizados para se determinar qual a melhor metodologia para ser determinar os parâmetros de Weibull aplicados a energia eólica, dentre estes testes estatísticos são citados os seguintes:

### 2.3.1 Teste do Qui-quadrado

O princípio básico deste teste é comparar proporções, isto é, as possíveis divergências entre as frequências observadas e esperadas para determinado evento. Para aplicar o teste as seguintes proposições precisam ser satisfeitas:

- Os grupos são independentes,
- Os itens de cada grupo são selecionados aleatoriamente,
- As observações devem ser frequências ou contagens,
- Cada observação pertence a uma e somente uma categoria e
- A amostra deve ser relativamente grande

O teste do qui-quadrado é representado pela letra  $X^2$  e é determinado por:

$$X^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N - n} \quad (20)$$

Onde  $N$  é o número de observações,  $y_i$  é a frequência relativa das observações,  $x_i$  é definido como a frequência de Weibull e  $n$  é o número de constantes analisadas.

### 2.3.2 Teste RMSE

Esta análise é uma análise de previsão, ou seja, quanto menor o seu valor, maior será a habilidade do método de fazer projeções futuras, uma boa tradução da sigla seria a raiz quadra do erro quadrático médio e o seu valor é determinado por:



$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

Onde  $N$  é o número de observações,  $y_i$  é a frequência relativa das observações e  $x_i$  é definido como a frequência de Weibull.

### 2.3.3 Análise de variância

Utiliza-se a análise de variância quando se deseja medir ou avaliar um determinado experimento que foi submetido a diferentes tratamentos, mostrando qual tratamento fora o mais eficiente para aquele experimento realizado. Representado por  $R^2$ , também é conhecido por eficiência do método. E pode ser determinado pela a equação abaixo:

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2} \quad (22)$$

Onde  $N$  é o número de observações,  $y_i$  é a frequência relativa das observações,  $x_i$  é definido como a frequência de Weibull e  $z_i$  é a velocidade média do vento e o termo  $EF$  é a eficiência do método.

Para se utilizar a análise de variância algumas premissas devem ser respeitadas, conforme segue:

- A variável aleatória deverá ser contínua,
- O teste deve ser paramétrico,
- Os grupos devem ser independentes,
- Os dados devem ser de origem qualitativa ou quantitativa.

## 2.4 Análise Física dos Métodos Propostos Para Estimar os Parâmetros de Weibull.

A análise física dos métodos numéricos objetos desta dissertação é feita através da determinação do erro da potência ( $EP$ ), onde são relacionadas a potência teórica ou potência de Weibull ( $E_w$ ) e a potência esperada ( $E_a$ ) através da equação abaixo:

$$ERROR(\%) = \left| \frac{E_w - E_a}{E_a} \right| \quad (23)$$

Onde:

$$E_w = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) T \quad (24)$$

$$E_a = \frac{1}{2} \rho v^3 T \quad (25)$$

E  $\rho$  é a densidade do ar, cujo valor é  $1,225 \text{ kg/m}^3$ . Neste caso o método mais eficiente será aquele que apresentar menor erro.

A análise do erro da densidade de energia proposto por AKGAD (2009). Este método é recomendado quando se têm parâmetros de escala estimados e quando se deseja uma formulação mais simples e de fácil processamento, não necessitando iterações numéricas complicadas, como é o caso de outros métodos apresentados.

## 2.5 Publicações relacionadas

Os trabalhos citados abaixo serviram de referência para a fundamentação teórica desta dissertação, onde são mostrados quais parâmetros foram utilizados para se determinar a eficiência dos métodos

numéricos utilizados na determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$  em diversas regiões do mundo.

Cada publicação citada a seguir faz referência à comparação de métodos numéricos e análises estatísticas e física de cada metodologia proposta, sendo as mesmas mencionadas nas referências bibliográficas desta dissertação.

Chang (2011) analisou e comparou seis métodos numéricos, gráfico, empírico, momento, máxima verossimilhança, máxima verossimilhança modificado e energia padrão, a partir de dados de velocidade do vento de Taiwan, chegando à conclusão que dentre estes métodos os métodos da máxima verossimilhança e da máxima verossimilhança modificado eram os métodos de maior eficiência para estimar os parâmetros de Weibull, utilizando para isto o teste RMSE e o teste do erro da potência.

Em outra publicação, Akdag & Dinler (2009) desenvolveram o método da energia padrão, fazendo comparações de eficiência com os métodos numéricos gráfico, momento e máxima verossimilhança, concluindo que o método da máxima verossimilhança é o método mais eficiente para estimar os parâmetros de Weibull, tendo utilizado para chegar a esta conclusão os testes de análise de variância, RMSE e teste do erro da potência.

Akpinar & Akpinar (2004) utilizaram o método gráfico para estimar os parâmetros  $k$  e  $c$  para as regiões Maden-Elazig, Turquia, utilizando os testes do Qui-quadrado, RMSE e análise de variância para se analisar a distribuição de Weibull

Em uma dissertação de mestrado desenvolvida por Silva (2003), foi desenvolvido um novo método para se estimar os parâmetros da distribuição de Weibull, chamado de método da energia equivalente, onde foram comparados os métodos da máxima verossimilhança, método da máxima semelhança. Silva concluiu que o novo método proposto é o método mais eficiente para se determinar a distribuição de Weibull, utilizando para isto a análise do erro da potência.

Dorvlo (2001) comparou e avaliou o método gráfico e o método do momento através do teste do Qui-Quadrado ( $X^2$ ). Nesta análise Dorvlo concluiu que o método do momento era mais indicado para determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ .

### **3. DADOS DA SEINFRA-CE**

#### **3.1 Direção dos ventos**

Segundo dados da SEINFRA-CE (2008), a distribuição de ventos no estado do Ceará no período Março-Abril, ápice do período chuvoso, predominam ventos de Sudeste (SE) ( $120^{\circ}$ - $150^{\circ}$ ) ao longo do dia, passando a Sul-Sudeste-Sul (SSE-S) ( $150^{\circ}$ - $180^{\circ}$ ) durante a noite. Este comportamento está associado à posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e à contribuição das brisas terrestres. Sem a presença da ZCIT, a estabilidade térmica da atmosfera se torna mais neutra ou estável, e o gradiente vertical de velocidade de vento atinge seus valores mais elevados especialmente à noite, pelo efeito de rugosidade continental associado à direção SE (brisas terrestres). Gradativamente nos meses seguintes, o vento se torna mais intenso, especialmente ao longo do dia. No período de Setembro-Dezembro, tanto os ventos alísios quanto as brisas marinhas se intensificam, e ao longo dos dias e noites sopram ventos quase constantes, predominando velocidades superiores a 10m/s (a partir de 40m de altura). Devido ao continente mais aquecido do que o oceano, os ventos de quadrante Este-Nordeste (E-NE) atingem a costa oriunda da baixa rugosidade marítima, com baixa turbulência. Quanto à constância dos ventos, notoriamente se observa que ocorre certa constância dos ventos durante o ano inteiro no litoral cearense, possibilitando uma maior abrangência de estudos a serem realizados a fim de se estabelecer um melhor critério para a distribuição de Weibull na região.

#### **3.2 Coleta de dados**

A torre anemométrica para a cidade de Paracuru foi instalada no ponto com as seguintes coordenadas:  $03^{\circ} 24' 42,4''$  S e  $38^{\circ} 59' 2,8''$  W. Esta campanha de medição do vento se baseou na medição da velocidade em três diferentes alturas (60,4m, 40,2m e 20,4m) e da sua direção nas alturas de 58,8m e 40,2m. A Figura 5 mostra a instalação dos anemômetros e dos sensores de direção para a torre anemométrica instalada na cidade Paracuru-Ce:

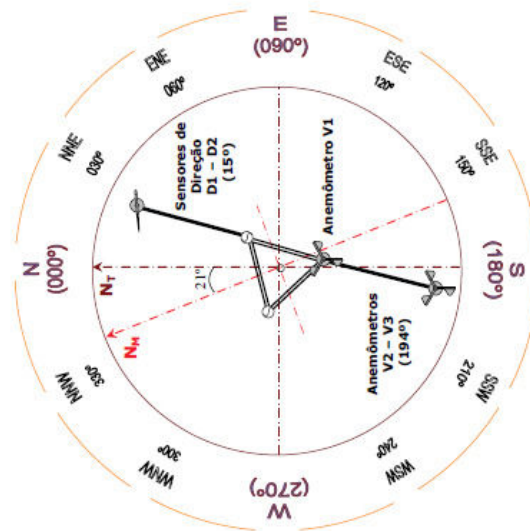


Figura 5 – Localização dos Anemômetros/sensores direção de Paracuru

FONTE: Rel. Tec. Proj. Paracuru – Nov. 2004

A torre anemométrica para a cidade de Camocim foi instalada no ponto com as seguintes coordenadas:  $02^{\circ} 51' 56,7''$  S e  $40^{\circ} 53' 9,2''$  W. Esta campanha de medição do vento se baseou na medição da velocidade em três diferentes alturas (60,4m, 40,2m e 20,6m) e da sua direção nas alturas de 60,0m e 40,2m. A Figura 6 mostra a instalação dos anemômetros e dos sensores de direção para a torre anemométrica instalada na cidade de Camocim-Ce:

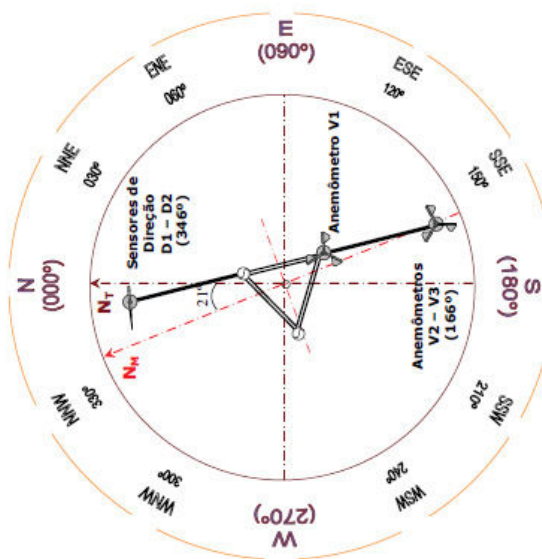


Figura 6 – Localização dos Anemômetros/sensores direção de Camocim

FONTE: Rel. Tec. Proj. Camocim – Out. 2004

Em cada torre foram usados 03 anemômetros, medindo velocidades em 02 direções distintas, sendo considerada a média das velocidades para cada altura de medição da velocidade do vento. Os dados de temperatura do ar foram medidos numa altura de 13,4m, tendo uma média de variação diurna de aproximadamente 3°C a 5°C, dependendo do período do ano. A altura de 13,4m utilizada para medir a temperatura do ar também serviu para se fazerem medições auxiliares de velocidade de vento, apenas para efeito de comparação com as medições feitas nas demais alturas já descritas.

. A coleta destes dados permitiu a obtenção dos dados de velocidade do vento a seguir:

- Valores médios e desvios padrão,
- Fatores de correlação e autocorrelação,
- Distribuição da frequência real de ocorrências,
- Distribuição estatística de Weibull.

As leituras foram realizadas diariamente por 24 horas, durante todo o período de realização do experimento, sendo realizadas leituras da velocidade do vento a cada 2s, para ambas as localidades e nas diferentes alturas já descritas anteriormente, sendo gerados relatórios com a média das velocidades a cada 10min. Esta média de velocidade de 10min é que foi utilizada para a elaboração das curvas nesta dissertação.

### **3.3 Validação e condicionamento dos dados coletados**

O processo de condicionamento e validação dos dados seguiu o modelo apresentado na Figura 7. Todos os dados gerados foram catalogados e disponibilizados para acesso ao público através do site [www.seinfra.ce.gov.br](http://www.seinfra.ce.gov.br), sendo gerados relatórios mensais com os valores condensados e validados.



**Figura 7 - Etapas de condicionamento e validação**  
**FONTE: Relatório Tec. Projeto Paracuru, Abril 2006**

### **3.4 Instrumentação**

A especificação dos equipamentos e a instalação da torre anemométrica seguiram as metodologias utilizadas internacionalmente visando à conformidade com as recomendações da *International Energy Agency – IEA* (1999) (SEINFRA-CE, 2008). Estas recomendações visam à redução ou à minimização das incertezas nas medições das velocidades do vento nas diferentes alturas e direções.

### **3.5 Velocidade Média e Desvio Padrão dos Dados Observados do Vento**

Para os dados utilizados são mostradas as velocidades médias e os desvios padrão na Tabela 2 para os valores de velocidade de vento coletados nas cidades de Camocim e Paracuru, entre os anos de 2004 a 2006

Tabela 2: Média e Desvio Padrão da Velocidade do Vento

Ano	Período	Velocidade média (m/s)		Desvio Padrão	
		Camocim	Paracuru	Camocim	Paracuru
2004	Agosto	8,908050	9,927720	3,181930	1,963850
	Setembro	9,890920	11,532670	3,508120	1,668370
	Outubro	10,651300	11,166640	3,722250	1,687410
	Novembro	10,322720	10,606940	3,675660	1,785480
	Dezembro	9,367440	9,640220	3,291400	1,707840
	2004		9,943010	10,64680	3,564280
2005	Janeiro	7,980050	8,388040	3,357040	2,325030
	Fevereiro	7,468340	8,485420	2,974800	2,198190
	Marco	6,344830	6,849310	2,736720	2,930500
	Abril	5,897300	7,741740	2,095790	2,236180
	Mai	6,099300	7,483910	1,887990	2,368960
	Junho	6,952250	7,581390	1,957030	2,205010
	Julho	7,867300	9,258700	2,793140	1,819990
	Agosto	9,015830	11,061120	3,042820	1,724380
	Setembro	9,965080	-	3,516770	-
	Outubro	10,601640	11,269550	3,707410	1,999090
	Novembro	10,516150	10,520700	3,498810	1,715990
	Dezembro	9,431290	9,731110	3,491800	1,747190
	2005		8,182420	8,949850	3,403040
2006	Janeiro	9,070080	10,171910	3,408520	1,554950
	Fevereiro	7,194100	6,882440	2,840680	2,056780
	Marco	5,773190	6,258230	2,184040	2,088900
	Abril	4,630000	4,513880	1,754940	1,919270
	2006		6,670630	6,978830	3,112190

#### 4. METODOLOGIA DA PESQUISA

Para a realização deste trabalho foi considerada a velocidade média medida na altura de 60,4m, tanto para a cidade de Camocim como para Paracuru, visto que as atuais torres eólicas que estão montadas na região são torres que possuem alturas de cerca de 100m no rotor, além de as avaliações nas outras alturas utilizadas na coleta de dados possivelmente não agregarem conclusões ao trabalho, visto que se espera que os métodos utilizados devam ter eficiências similares para uma mesma locação. Os dados de velocidade utilizados foi a média da velocidade do vento calculada a cada 10min conforme relatórios gerados pela instrumentação utilizada em todo o período de observações realizadas.



#### 4.1 Ferramentas Utilizadas Para Solução dos Métodos Numéricos

Os dados brutos recebidos da Secretária de Infraestrutura do Estado do Ceará estavam no formato de texto, sendo necessária a importação dos mesmos para uma planilha eletrônica, gerando arquivos com as velocidades do vento nas alturas já descritas. Com a utilização do algoritmo de Newton-Rhapson, quando apropriado, foram determinados os parâmetros  $c$  e  $k$  em cada método proposto para avaliação da distribuição de Weibull, sendo utilizado o programa Origin Pro 8.0 (versão de demonstração) para a geração das curvas com os parâmetros determinados, como também para a determinação de  $c$  e  $k$ , quando apropriado. Cada método gerou curvas mensais, além de uma anual, que estão descritas e mostradas *a posteriori*.

Além das curvas para cada método foram geradas tabelas com os parâmetros  $c$  e  $k$ , bem como os erros de cada função predeterminada por cada método estatístico proposto neste trabalho. Aumentou-se desta forma a facilidade de comparação da potência prevista pelos dados ajustados com a dos dados experimentais, para determinação da melhor metodologia de ajuste a ser aplicada. A Tabela 3 mostra o modelo de dados de velocidade de vento já em planilha eletrônica, prontos para serem utilizados na elaboração das curvas dos métodos numéricos propostos, através de medições anemométricas realizadas em intervalos de 2s com gravação da média aritmética da velocidade do vento a cada 10min. Os dados de velocidades mostrados são as velocidades médias referentes a cada altura já especificada anteriormente.

**Tabela3-Ex. Tabulação – Média velocidades de vento em diferentes alturas**

Abr/06				
Date	Time	Velocidade (m/s)		
		60,4m	40,2m	20,6m
		V1	V2	V3
1/4/2006	00:00	4,68	4,77	4,68
	00:10	5,04	5,04	4,94
	00:20	4,27	4,37	4,25
	00:30	4,46	4,51	4,29

Fonte: SEINFRA-CE (2008)

Para a resolução dos métodos numéricos utilizados para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull, pode-se utilizar os métodos numéricos recomendados pela literatura para solução de problemas que envolvam iterações numéricas. Uma solução comum é a aplicação do algoritmo de Newton-Rhapson, pois se trata de um método amplamente conhecido, de fácil implementação e já utilizado em outras literaturas sobre o ajuste à distribuição de Weibull.

Para a determinação das iterações numéricas utilizando o método de Newton-Rhapson normalmente se fazem necessários programas computacionais para a realização destes cálculos. Ghosh (1999), por exemplo, utilizou um programa escrito em Fortran 77 para obtenção de seus resultados e compilação dos dados utilizados.

#### **4.2 Valores Esperados para os Parâmetros Estatísticos de Análise dos Métodos.**

Para cada análise estatística e análise física realizada são esperados valores para seus respectivos cálculos, estes dados são mostrados a seguir.

- No caso da raiz quadrada dos erros quadráticos médios (*RMSE*), os valores esperados devem ser próximos de zero;
- Na eficiência do método (*EF*), os valores esperados devem ser próximos de 1(um);
- Para o teste do qui-quadrado ( $X^2$ ), esperam-se valores próximos de zero;
- Análise de potência, para este caso o erro calculado através da equação deve ser próximo de zero.

Através desta análise se determina a eficiência dos métodos a serem utilizados na determinação do ajuste da curva de Weibull.

### 4.3 Comparação dos Parâmetros $c$ e $k$ Para Cada Método Numérico

Após a determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull, através de cada método proposto neste trabalho, foram elaboradas tabelas que são mostradas posteriormente, com os dados de  $c$  e  $k$  calculados através destes métodos, com a finalidade de se verificar a existência de discrepância destes valores, ou seja, avaliar se os métodos que são recomendados pela literatura são adequados para a determinação da distribuição de Weibull.

Para que se possa avaliar melhor as curvas geradas através do programa Origin Pro 8.0 foi necessário determinar o incremento que deve ser utilizado para se adicionar os histogramas em cada distribuição de Weibull calculada, este incremento foi determinado através da equação abaixo, conforme (CHANG, 2011).

$$B = V_{max}/([3,3 \ln (n) + 1]) \quad (26)$$

Onde  $B$  é o incremento a ser utilizado,  $V_{max}$  é a máxima velocidade dentre os dados amostrais e  $n$  é o número de dados existentes.

A quantidade de curvas elaboradas para cada método por período e localidade é mostrada na Tabela 4.

**Tabela 4: Quantidade de Curvas Geradas por Período de Coleta de Dados**

Período da medição anemométrica	Quantidades de Curvas Mensais Geradas	Quantidades de Curvas Anuais Geradas	Total de Curvas
Agosto a Dezembro de 2004	10	2	12
Janeiro a Dezembro de 2005	23	2	25
Janeiro a Abril de 2006	8	2	10

Estas curvas são mostradas a seguir, onde é possível se visualizar através dos gráficos gerados quais métodos trazem melhor ajuste com a distribuição de Weibull.

#### 4.4 Valores Estimados de $k$ e $c$

Segundo CIEMAT (2002), os valores de  $k$  podem ser estimados a partir da variabilidade dos ventos de cada região em estudo, conforme segue:

- Para regiões com ventos de baixa variabilidade,  $\left(\frac{\sigma}{vm}\right) \cong 0,1$ , o valor de  $k$  pode ser estimado por:

$$k = 1,05\sqrt{vm} \quad (27)$$

- Para regiões com ventos de média variabilidade,  $\left(\frac{\sigma}{vm}\right) \cong 0,5$ , o valor de  $k$  pode ser estimado a partir da equação:

$$k = 0,94\sqrt{vm} \quad (28)$$

- Para regiões com ventos de alta variabilidade,  $\left(\frac{\sigma}{vm}\right) \cong 0,9$ , o valor de  $k$  pode ser estimado a partir da equação abaixo:

$$k = 0,83\sqrt{vm} \quad (29)$$

Onde  $vm$  é a velocidade média das observações realizadas e  $\sigma$  é o desvio padrão das observações.

#### 4.5 Análise Estatística e Análise Física da Distribuição de Weibull

Para a análise dos erros de cada curva gerada a partir de cada método numérico foram consideradas neste trabalho as análises estatísticas do  $X^2$ ,  $R^2$

e RMSE, sendo considerado o método de maior eficiência aquele que obtivesse menores valores de  $X^2$  e RMSE e maiores valores de  $R^2$ .

Para a análise física, foi considerado o teste do erro da potência, sendo considerado o método numérico de maior eficiência para estimar os parâmetros de Weibull, aquele que obtivesse menor erro.

Foram feitas as curvas e as análises dos erros tanto em base mensal como em base anual, para as cidades de Paracuru e Camocim-Ce, seguindo-se dos respectivos valores dos parâmetros de Weibull calculados através dos métodos numéricos utilizados nesta dissertação de mestrado, mostrando-se as possíveis divergências existentes entre os valores de  $k$  e  $c$ .

## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Para cada período de coleta de dados anemométricos são mostradas as curvas mensais e curva anual com a distribuição de Weibull das cidades de Camocim e Paracuru-Ce, plotadas a partir da determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$  dos respectivos métodos numéricos, além das curvas com os erros estatísticos e os erros da potência comparando e avaliando cada método numérico de forma simples e rápida.

### **5.1 Curvas e Tabelas Mensais – 2004**

A seguir são mostradas as curvas mensais elaboradas a partir de dados coletados na cidade de Camocim e Paracuru referentes ao ano de 2004, além das tabelas com os erros calculados para cada método numérico utilizado na determinação destas respectivas curvas. Facilitou-se desta forma a interpretação dos dados calculados com as respectivas curvas elaboradas.

#### **5.1.1 Distribuição de Weibull – (Camocim-Ce 2004)**

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros mensais para cada mês referente ao ano de 2004 para a cidade Camocim-Ce, seguindo a ordem cronológica dos dados coletados nesta localidade.

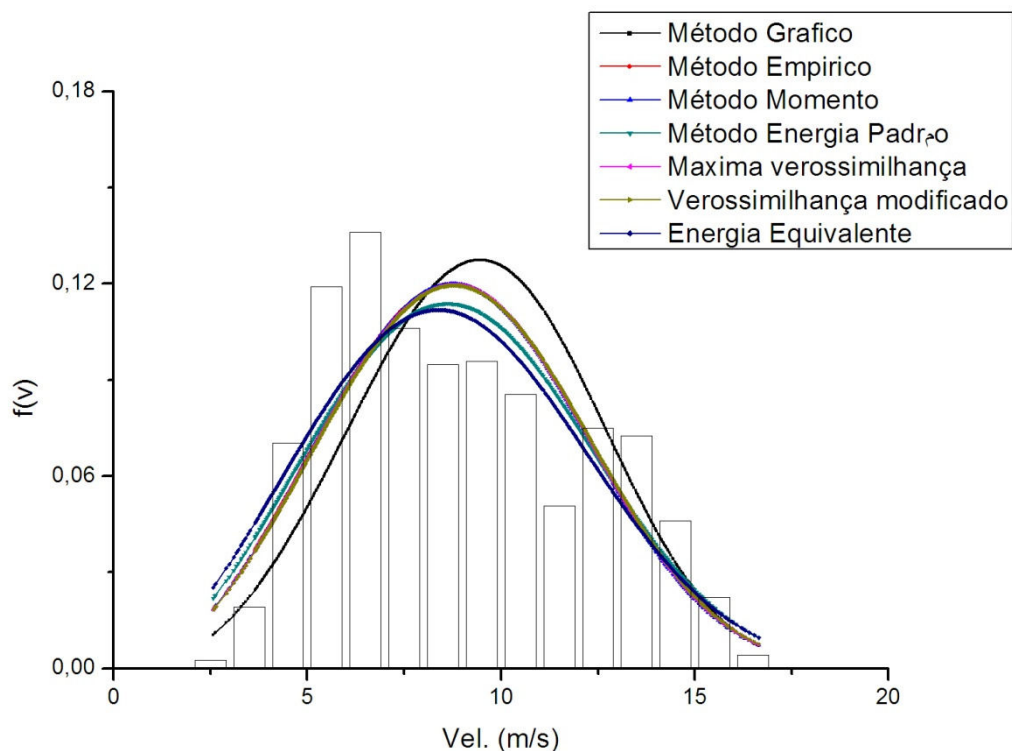


Figura 8 – Distribuição de Weibull – Camocim agosto de 2004

Tabela 5 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Ago 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,451000	10,440000	0,034970	0,0012700000	0,944330	9,57E-02
Empírico	3,058740	9,967000	0,030440	0,0009620450	0,957820	6,14E-03
Momento	3,058570	9,967020	0,030430	0,0009619050	0,957820	6,11E-03
Energia Padrão	2,887710	9,991820	0,028290	0,0008310740	0,963560	2,66E-02
Máxima Verossimilhança	3,059670	9,986700	0,030400	0,0009600200	0,957910	3,56E-04
Verossimilhança Modificado	3,056340	10,005400	0,030320	0,0009547900	0,958140	5,71E-03
Energia Equivalente	2,778000	9,842680	0,027440	0,0007818660	0,965720	3,61E-07

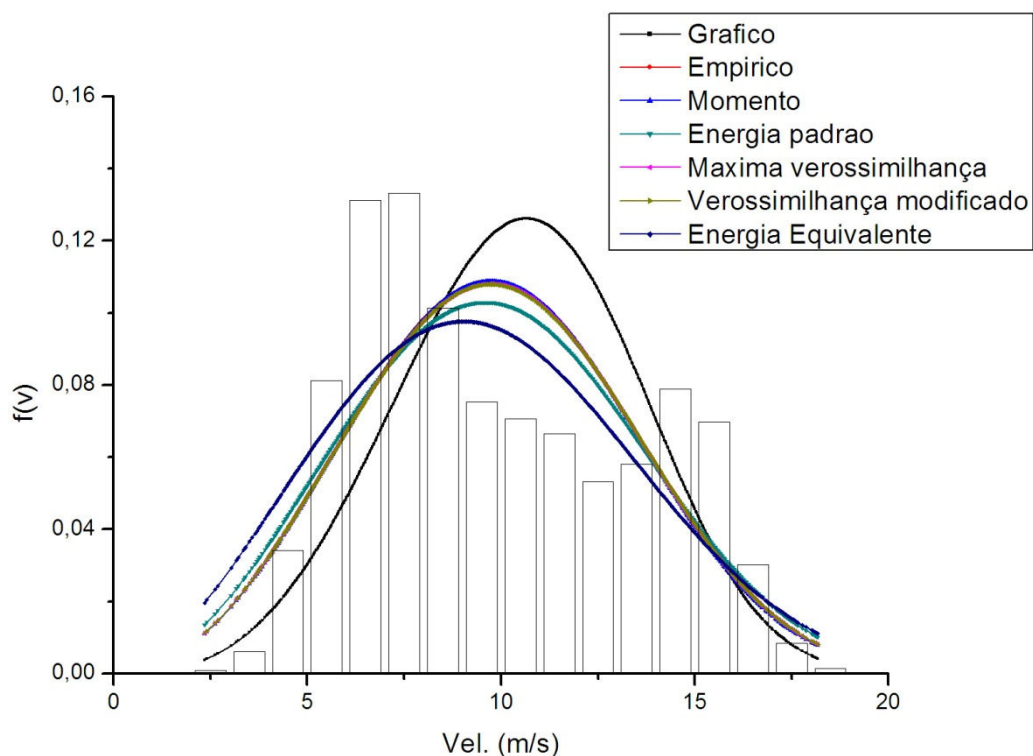


Figura 9 – Distribuição de Weibull – Camocim setembro de 2004

Tabela 6 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Set 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,809000	11,540000	0,038440	0,0015300000	0,932770	5,81E-02
Empírico	3,082310	11,062820	0,029930	0,0009264840	0,959260	6,74E-03
Momento	3,082790	11,062740	0,029930	0,0009268420	0,959240	6,82E-03
Energia Padrão	2,901000	11,092180	0,027830	0,0008015030	0,964750	2,74E-02
Máxima Verossimilhança	3,062970	11,080000	0,029670	0,0009107710	0,959950	3,95E-04
Verossimilhança Modificado	3,059670	11,084000	0,029630	0,0009080130	0,960070	1,91E-03
Energia Equivalente	2,641000	10,816460	0,025890	0,0006932120	0,969520	1,74E-06

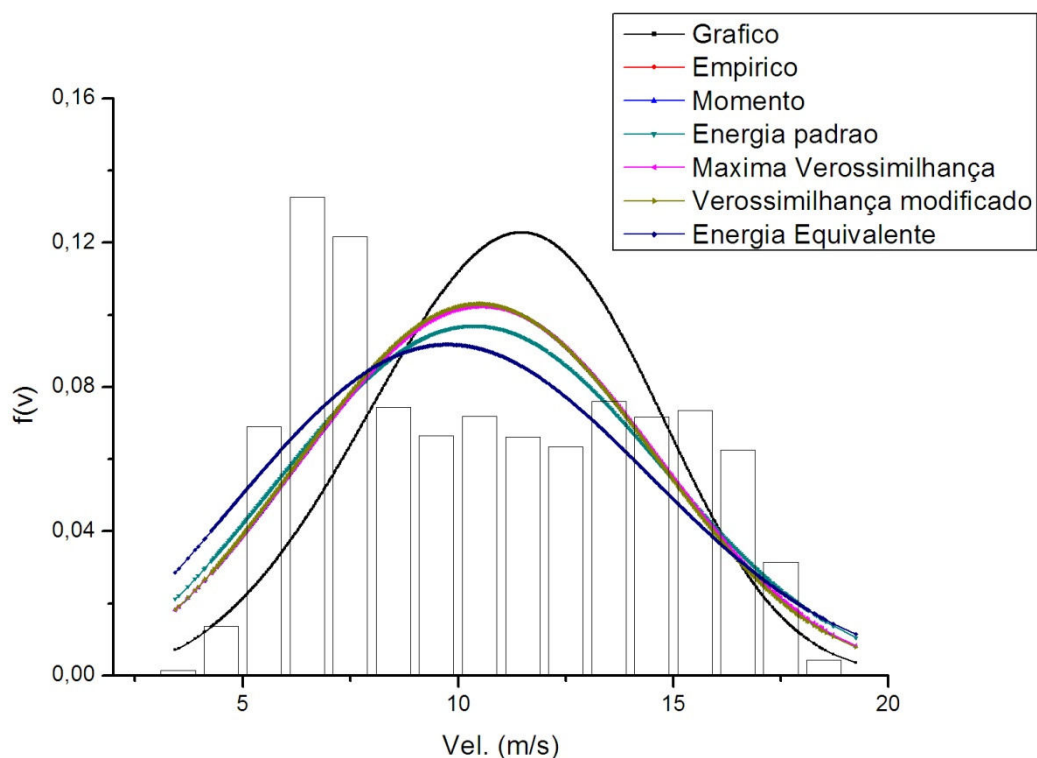


Figura 10– Distribuição de Weibull – Camocim Outubro de 2004

Tabela 7 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Out 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,979000	12,340000	0,037370	0,0014400000	0,936710	3,95E-02
Empírico	3,132310	11,904370	0,028430	0,0008363880	0,963360	2,96E-03
Momento	3,134400	11,903990	0,028460	0,0008377800	0,963300	3,31E-03
Energia Padrão	2,948210	11,936820	0,026440	0,0007233620	0,968310	3,05E-02
Máxima Verossimilhança	3,129560	11,915000	0,028380	0,0008333230	0,963500	4,79E-05
Verossimilhança Modificado	3,136400	11,864000	0,028570	0,0008441030	0,963020	1,36E-02
Energia Equivalente	2,676000	11,629370	0,024680	0,0006300800	0,972400	1,20E-06



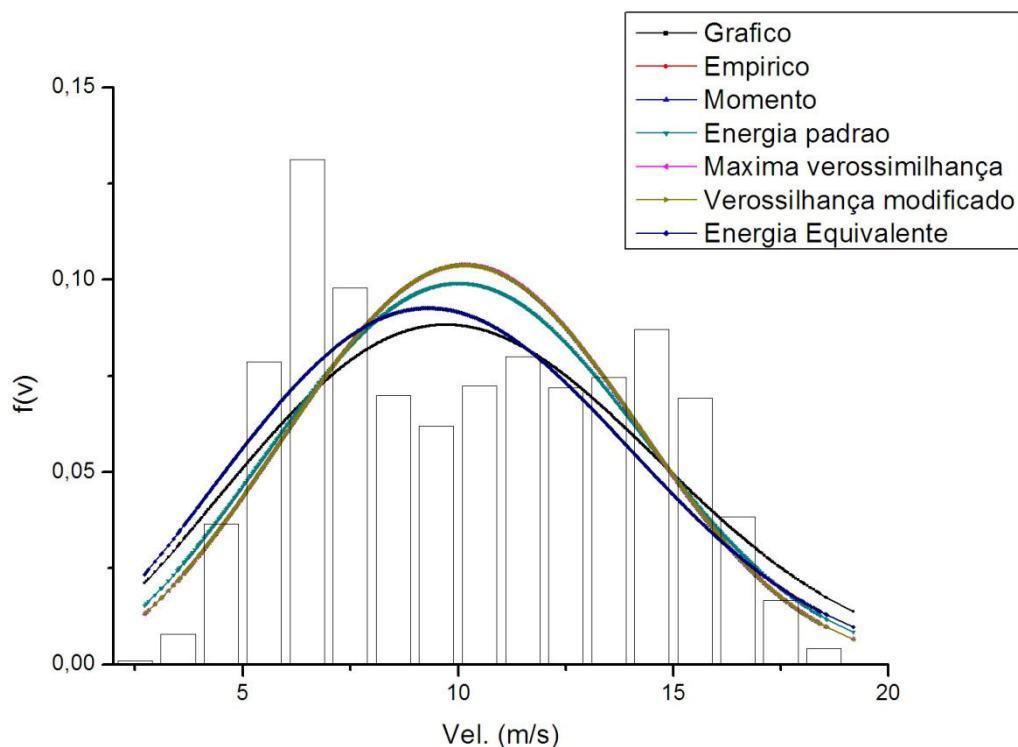


Figura 11– Distribuição de Weibull – Camocim Novembro de 2004

Tabela 8 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Nov 2004

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b><math>\chi^2</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
Gráfico	2,585000	11,750000	0,022180	0,0005088520	0,976570	1,47E-01
Empírico	3,069210	11,548040	0,027050	0,0007570000	0,965140	1,41E-04
Momento	3,069500	11,547990	0,027050	0,0007571830	0,965130	1,92E-04
Energia Padrão	2,917590	11,573680	0,025400	0,0006675770	0,969260	2,85E-02
Máxima Verossimilhança	3,068950	11,548000	0,027050	0,0007568480	0,965150	1,18E-04
Verossimilhança Modificado	3,067840	11,550300	0,027030	0,0007558330	0,965200	6,24E-04
Energia Equivalente	2,595000	11,233590	0,023510	0,0005719580	0,973660	6,60E-07

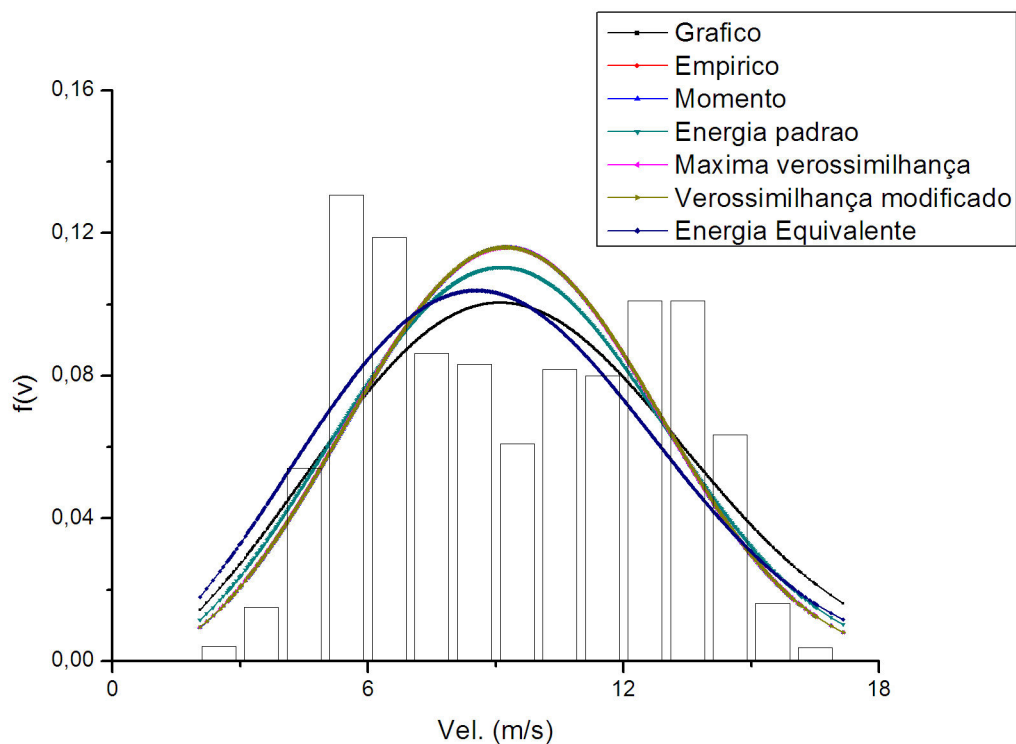


Figura 12– Distribuição de Weibull – Camocim Dezembro de 2004

Tabela 9 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Dez 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,720000	10,770000	0,028720	0,0008521140	0,963310	1,59E-01
Empírico	3,113900	10,472360	0,033750	0,0011800000	0,949330	1,51E-03
Momento	3,115300	10,472140	0,033760	0,0011800000	0,949280	1,27E-03
Energia Padrão	2,953660	10,497180	0,031840	0,0010500000	0,954880	3,08E-02
Máxima Verossimilhança	3,110100	10,463600	0,033730	0,0011800000	0,949370	5,35E-04
Verossimilhança Modificado	3,113500	10,469200	0,033750	0,0011800000	0,949310	6,50E-04
Energia Equivalente	2,656000	10,208470	0,029870	0,0009218780	0,960310	2,63E-06

### 5.1.2 Distribuição de Weibull – (Paracuru-Ce 2004)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros mensais para cada mês referente ao ano de 2004 para a cidade Paracuru-Ce, seguindo a ordem cronológica dos dados coletados nesta localidade.

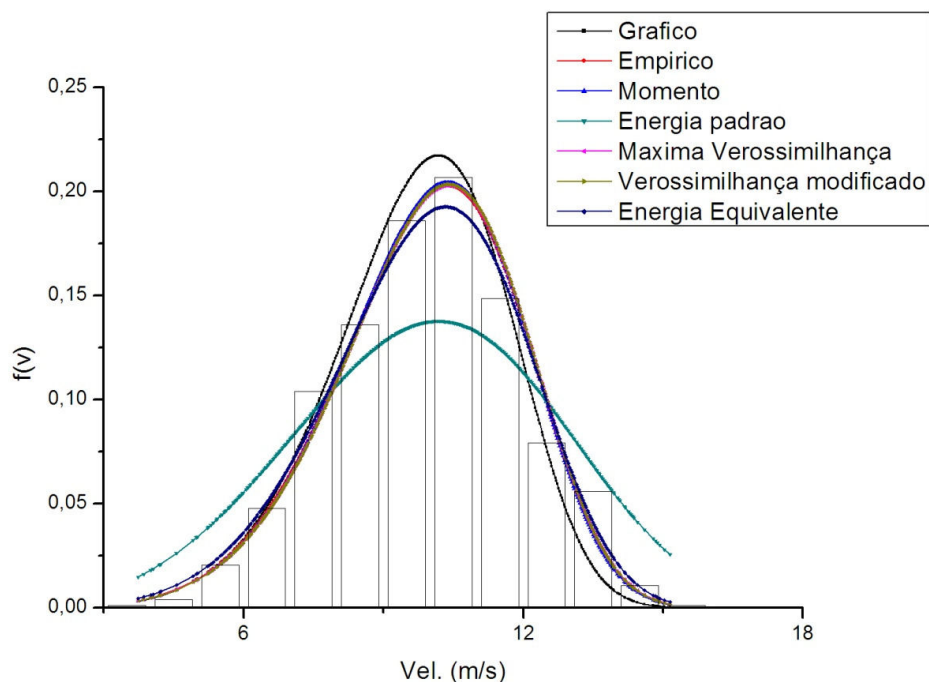


Figura 13– Distribuição de Weibull – Paracuru Agosto de 2004

Tabela 10 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência –Paracuru Ago 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	6,099000	10,480000	0,044100	0,0020200000	0,958540	6,65E-02
Empírico	5,811160	10,720270	0,040750	0,0017200000	0,964600	1,90E-04
Momento	5,862500	10,715010	0,041170	0,0017600000	0,963860	1,50E-03
Energia Padrão	3,960350	10,959080	0,029860	0,0009244590	0,981000	1,09E-01
Máxima Verossimilhança	5,833400	10,747000	0,040870	0,0017300000	0,964390	7,59E-03
Verossimilhança Modificado	5,847600	10,744500	0,040990	0,0017400000	0,964190	6,83E-03
Energia Equivalente	5,510000	10,713090	0,038440	0,0015300000	0,968500	8,52E-07

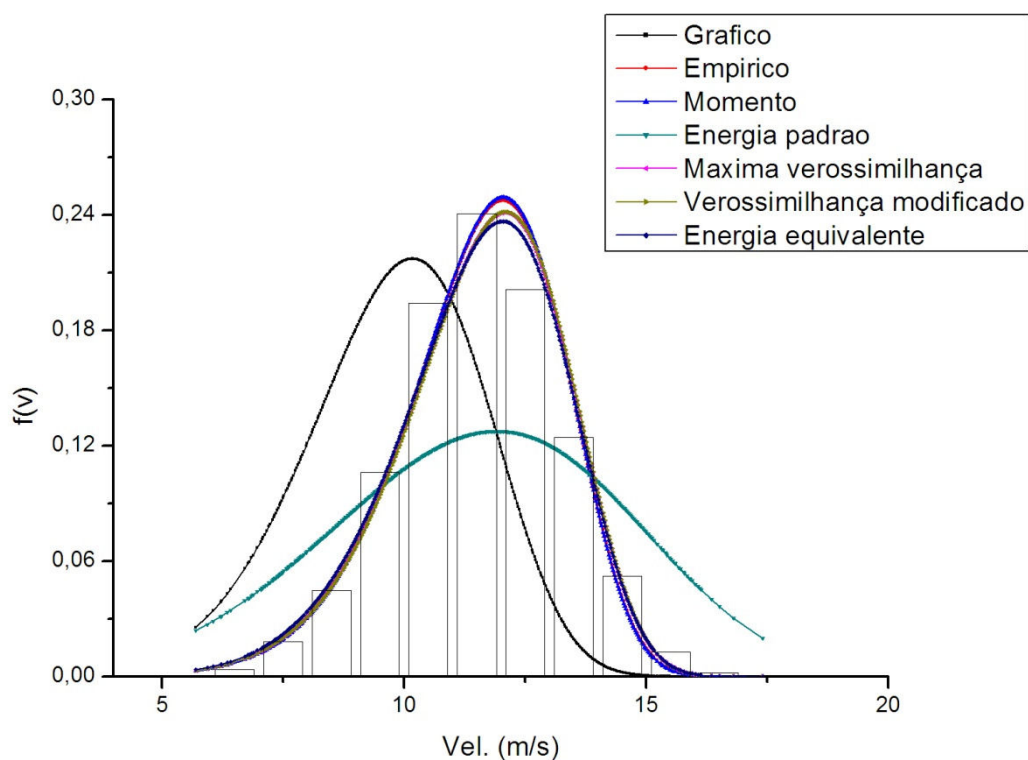


Figura 14– Distribuição de Weibull – Paracuru Setembro de 2004

Tabela 11 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Set 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	6,099000	10,480000	0,057060	0,0033700000	0,953100	3,74E-01
Empírico	8,162930	12,234180	0,040290	0,0016800000	0,976620	4,73E-04
Momento	8,217000	12,230310	0,040620	0,0017100000	0,976230	1,19E-03
Energia Padrão	4,269130	12,676140	0,030410	0,0009566640	0,986680	1,36E-01
Máxima Verossimilhança	7,987900	12,285000	0,039290	0,0016000000	0,977760	1,13E-02
Verossimilhança Modificado	8,005400	12,294700	0,039420	0,0016100000	0,977610	1,38E-02
Energia Equivalente	7,810000	12,241970	0,038130	0,0015000000	0,979060	2,63E-07

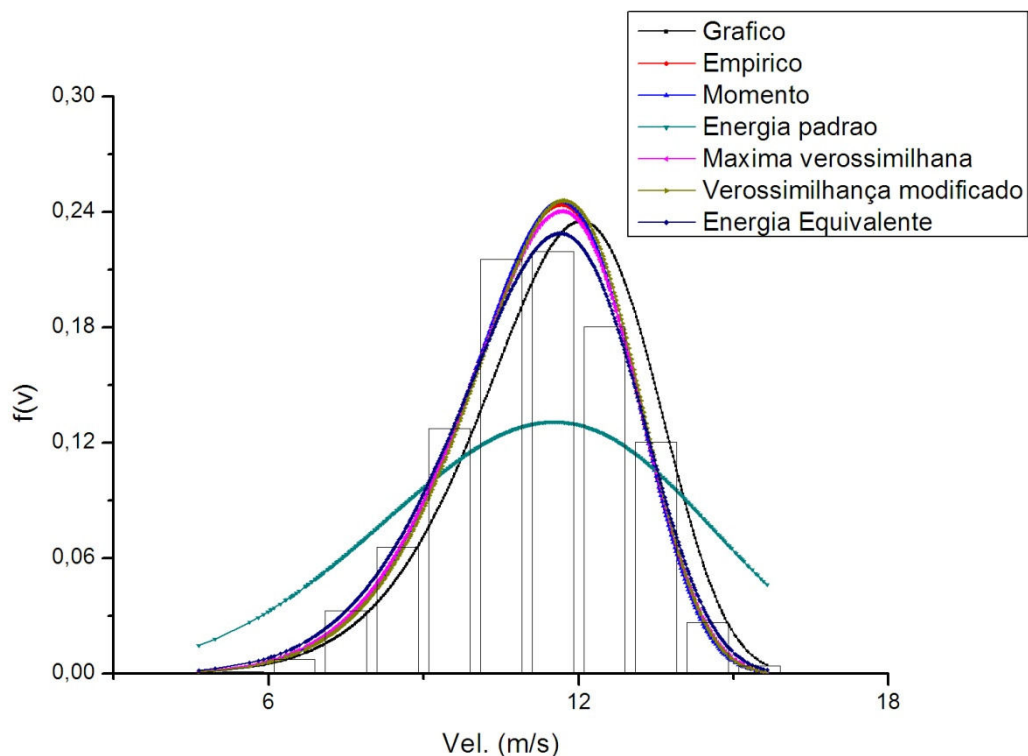


Figura 15– Distribuição de Weibull – Paracuru Outubro de 2004

Tabela 12 – Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Out 2004

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b><math>\chi^2</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	7,770000	12,270000	0,048340	0,0024200000	0,958840	1,43E-01
<i>Empírico</i>	7,785420	11,873200	0,048120	0,0024000000	0,959210	3,57E-02
<i>Momento</i>	7,845000	11,868750	0,048540	0,0024400000	0,958490	3,48E-02
<i>Energia Padrão</i>	4,237980	12,279010	0,032620	0,0011000000	0,981260	1,74E-01
<i>Máxima Verossimilhança</i>	7,697000	11,890000	0,047460	0,0023300000	0,960320	3,98E-02
<i>Verossimilhança Modificado</i>	7,898000	11,920000	0,048760	0,0024600000	0,958110	4,84E-02
<i>Energia Equivalente</i>	7,315000	11,878980	0,044930	0,0020900000	0,964440	3,56E-02

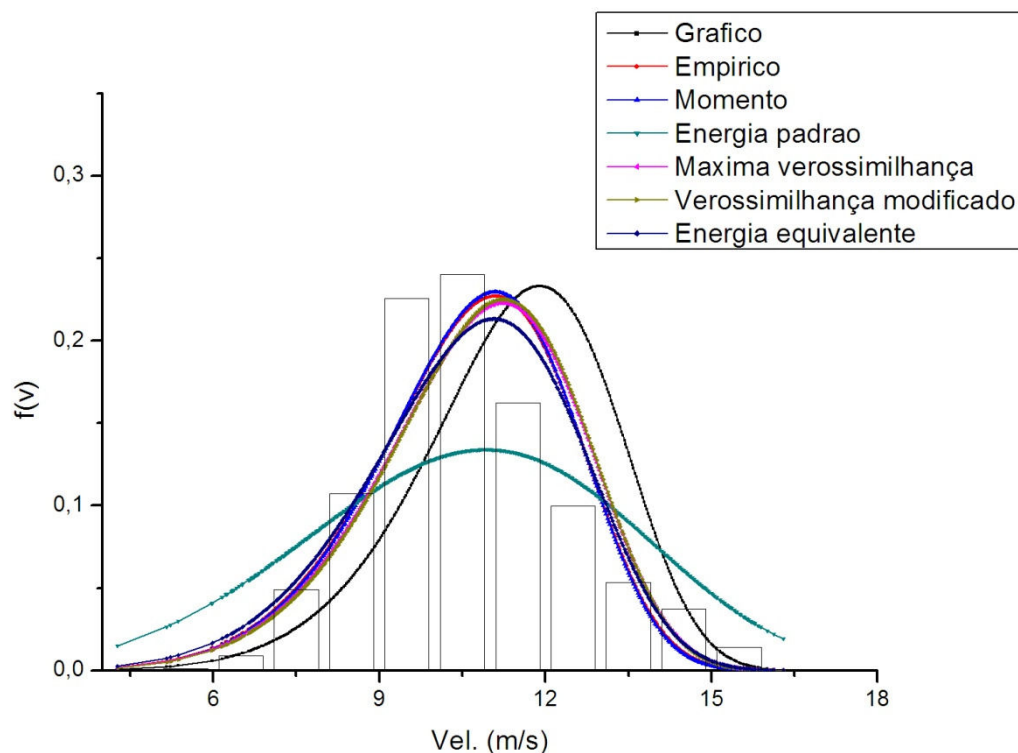


Figura 16– Distribuição de Weibull – Paracuru Novembro de 2004

Tabela 13- Análise Estatística e Análise do Erro de Potência – Paracuru Nov 2004

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b><math>\chi^2</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	7,611000	12,120000	0,057820	0,0033400000	0,945360	2,18E-01
<i>Empírico</i>	6,924440	11,345430	0,046020	0,0021200000	0,965380	2,56E-03
<i>Momento</i>	7,001000	11,338930	0,046530	0,0021700000	0,964610	4,13E-03
<i>Energia Padrão</i>	4,123150	11,681990	0,033420	0,0011200000	0,981740	1,24E-01
<i>Máxima Verossimilhança</i>	6,879000	11,483400	0,046470	0,0021600000	0,964700	3,42E-02
<i>Verossimilhança Modificado</i>	6,956000	11,497000	0,047120	0,0022200000	0,963710	3,80E-02
<i>Energia Equivalente</i>	6,502000	11,356630	0,043130	0,0019200000	0,969590	1,22E-06

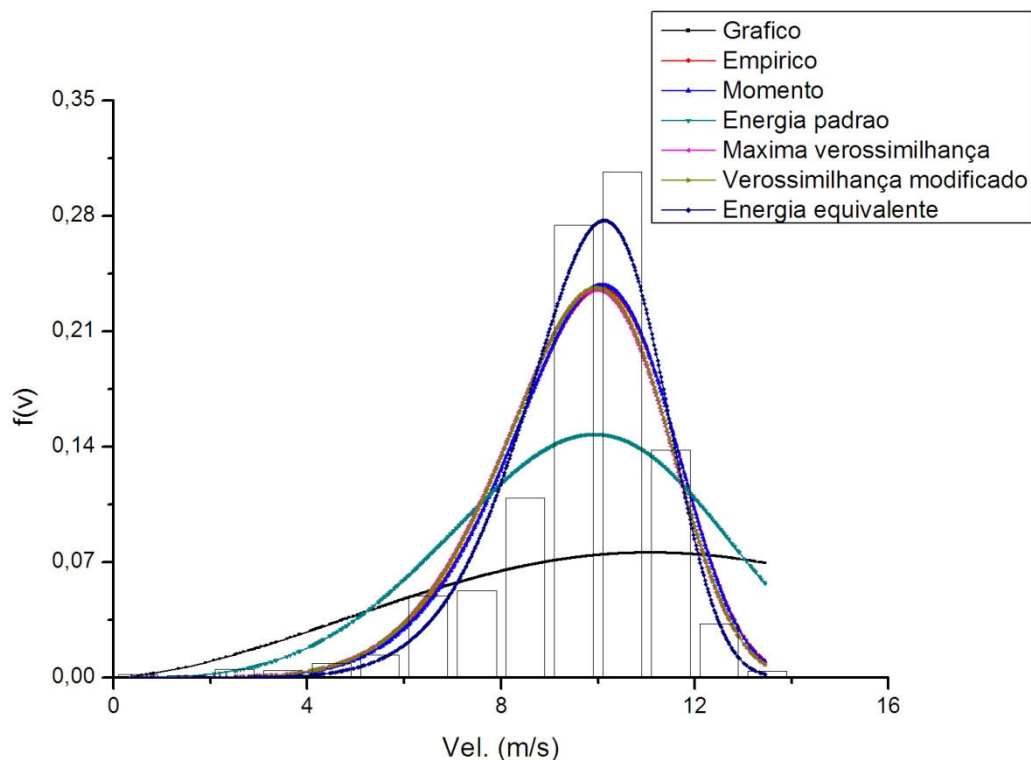


Figura 17– Distribuição de Weibull – Paracuru Dezembro de 2004

Tabela 14- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Dez 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,539000	13,500000	0,039380	0,0016000000	0,976060	1,76E+00
Empírico	6,550600	10,341730	0,055740	0,0032100000	0,952060	6,39E-03
Momento	6,610500	10,336700	0,056070	0,0032500000	0,951480	4,95E-03
Energia Padrão	4,126380	10,616810	0,046310	0,0022200000	0,966900	1,24E-01
Máxima Verossimilhança	6,453000	10,220000	0,056080	0,0032500000	0,951460	2,87E-02
Verossimilhança Modificado	6,489000	10,230000	0,056180	0,0032700000	0,951280	2,59E-02
Energia Equivalente	7,700000	10,310980	0,062370	0,0040200000	0,939970	9,52E-07

## 5.2 Curvas e Tabelas Mensais – 2005

A seguir são mostradas as curvas mensais elaboradas a partir de dados coletados nas cidades de Camocim e Paracuru referentes ao período de coleta de 2005, além das tabelas com os erros calculados para cada método numérico utilizado na determinação destas respectivas curvas. Verifica-se primeiramente a distribuição de Weibull referente a cada período e localidade, seguido das respectivas tabelas com os resultados dos erros por localidade e período de coleta de dados.

### 5.2.1 Distribuição de Weibull – (Camocim-Ce 2005)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros mensais para cada mês referente ao ano de 2005 para a cidade de Camocim-Ce seguindo a ordem cronológica dos dados coletados nesta localidade.

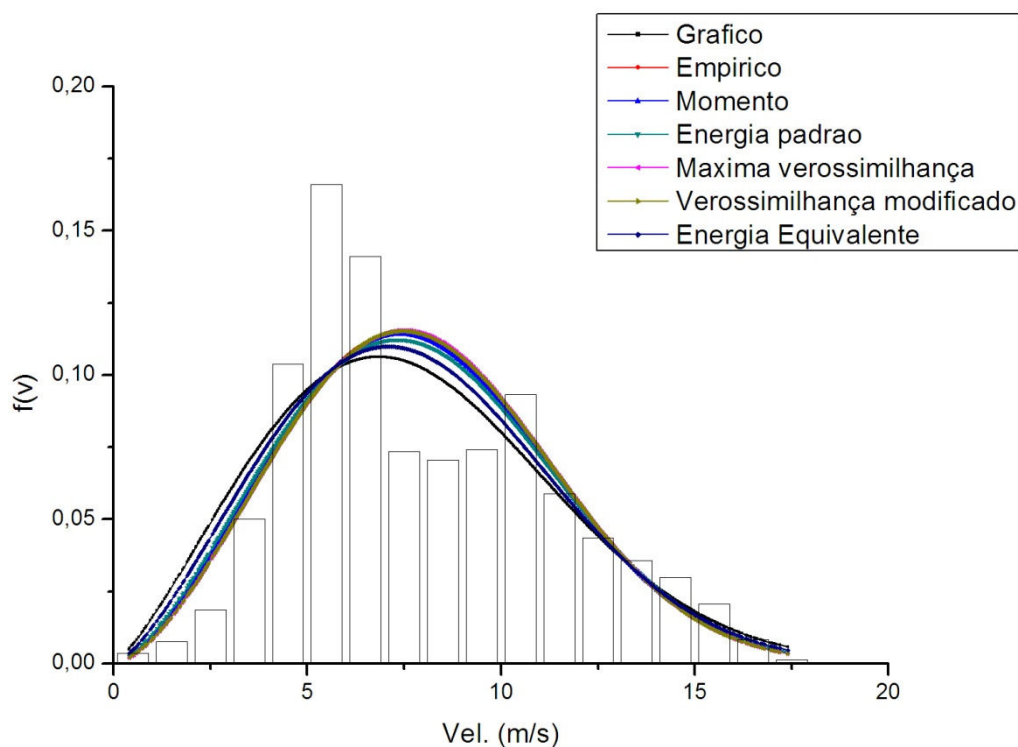


Figura 18– Distribuição de Weibull – Camocim Janeiro de 2005



Tabela 15- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Jan 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,274000	8,833000	0,028270	0,0008269170	0,966480	2,04E-02
Empírico	2,560880	8,988330	0,030740	0,0009774660	0,960380	1,16E-02
Momento	2,548030	8,989570	0,030590	0,0009678420	0,960770	8,12E-03
Energia Padrão	2,499340	8,994060	0,030030	0,0009327320	0,962190	5,69E-03
Máxima Verossimilhança	2,601000	9,035000	0,031120	0,0010000000	0,959390	5,59E-03
Verossimilhança Modificado	2,594000	9,034000	0,031040	0,0009965690	0,959600	4,32E-03
Energia Equivalente	2,395000	8,889960	0,029190	0,0008811380	0,964280	3,00E-07

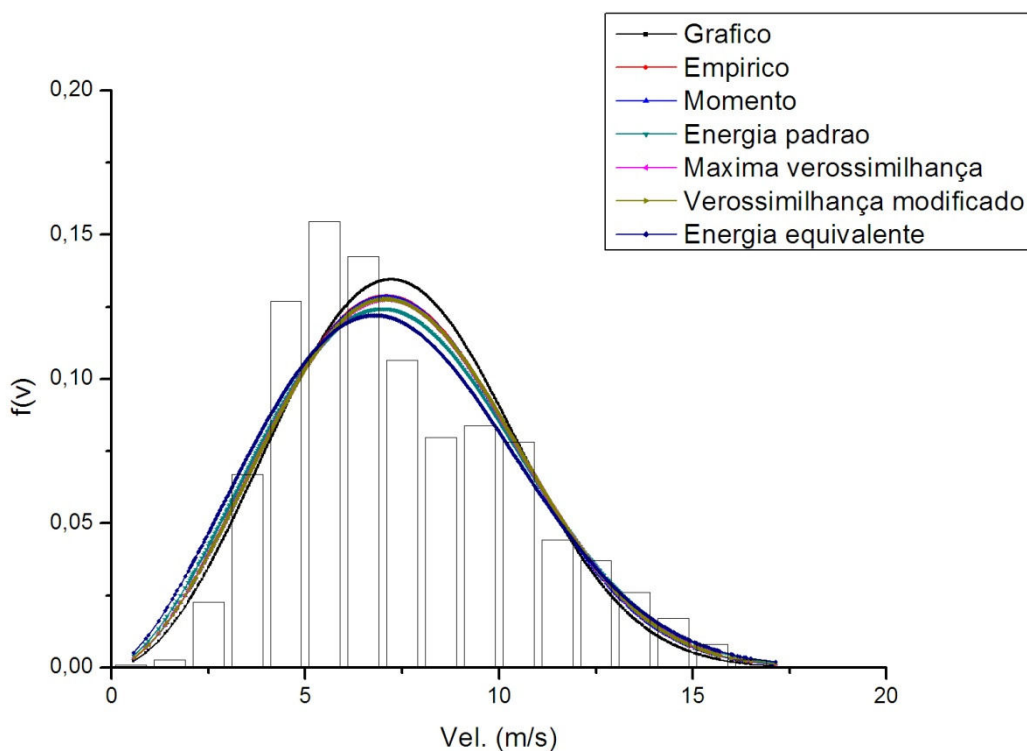


Figura 19– Distribuição de Weibull – Camocim Fevereiro de 2005

Tabela 16- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Fev 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,861000	8,392000	0,032160	0,0010700000	0,962560	4,23E-02
Empírico	2,717350	8,396300	0,030340	0,0009522210	0,966680	1,55E-02
Momento	2,708310	8,397270	0,030230	0,0009452570	0,966930	1,34E-02
Energia Padrão	2,611100	8,407230	0,029080	0,0008747950	0,969390	1,09E-02
Máxima Verossimilhança	2,695700	8,420000	0,030030	0,0009329780	0,967360	2,80E-03
Verossimilhança Modificado	2,700100	8,421000	0,030080	0,0009361320	0,967250	3,34E-03
Energia Equivalente	2,515000	8,312570	0,028300	0,0008283140	0,971020	7,74E-07

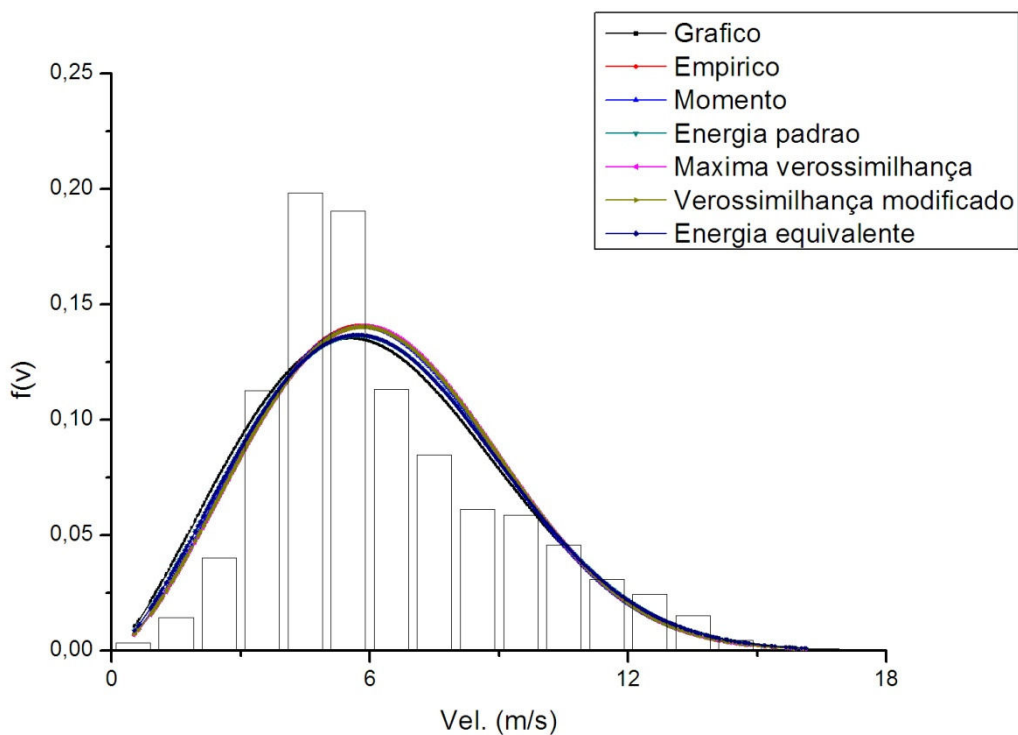


Figura 20– Distribuição de Weibull – Camocim Março de 2005

Tabela 17- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Mar 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,330000	7,070000	0,034190	0,0012100000	0,967230	1,30E-02
Empírico	2,492270	7,151550	0,035670	0,0013200000	0,964340	2,61E-02
Momento	2,477840	7,152530	0,035500	0,0013000000	0,964670	2,20E-02
Energia Padrão	2,400110	7,157310	0,034650	0,0012400000	0,966340	1,79E-03
Máxima Verossimilhança	2,500100	7,190000	0,035690	0,0013200000	0,964290	1,24E-02
Verossimilhança Modificado	2,491000	7,184000	0,035590	0,0013100000	0,964480	1,25E-02
Energia Equivalente	2,400000	7,152980	0,034660	0,0012400000	0,966320	1,78E-06

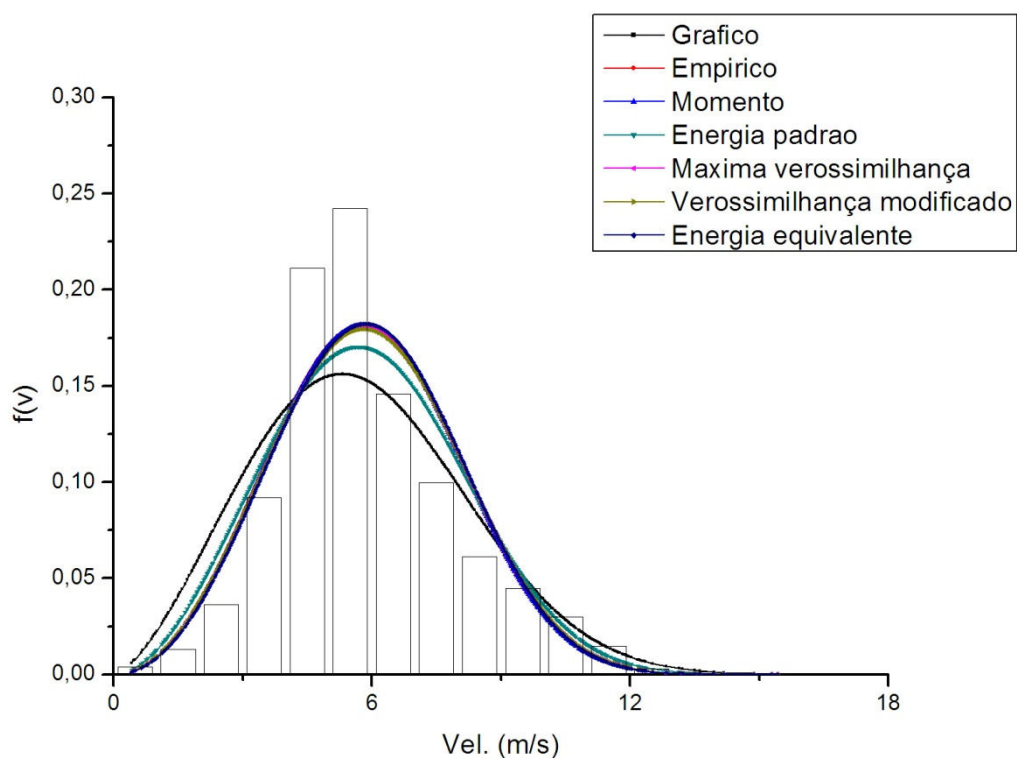


Figura 21– Distribuição de Weibull – Camocim Abril de 2005

Tabela 18- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Abr 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,517000	6,502000	0,038610	0,0015400000	0,970140	4,43E-02
Empírico	3,075710	6,596680	0,043000	0,0019100000	0,962970	1,68E-02
Momento	3,076030	6,596650	0,043000	0,0019100000	0,962960	1,68E-02
Energia Padrão	2,858600	6,617480	0,040740	0,0017200000	0,966760	2,48E-02
Máxima Verossimilhança	3,064000	6,634000	0,042810	0,0019000000	0,963300	1,55E-03
Verossimilhança Modificado	3,047000	6,634200	0,042620	0,0018800000	0,963620	3,89E-03
Energia Equivalente	3,104000	6,641880	0,043240	0,0019300000	0,962550	1,93E-06

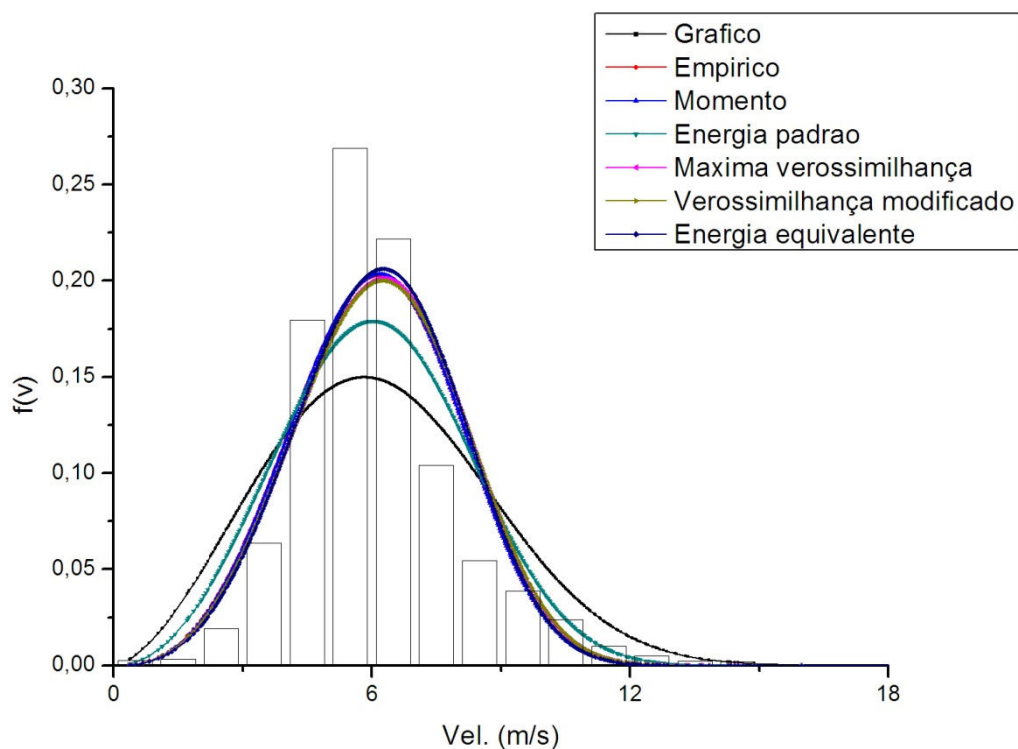


Figura 22– Distribuição de Weibull – Camocim Maio de 2005

Tabela 19- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Mai 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,620000	7,002000	0,031860	0,0010500000	0,987710	2,31E-01
Empírico	3,573370	6,771400	0,033040	0,0011300000	0,986780	1,93E-02
Momento	3,586960	6,770010	0,033130	0,0011400000	0,986710	2,09E-02
Energia Padrão	3,133910	6,816690	0,031190	0,0010100000	0,988220	4,32E-02
Máxima Verossimilhança	3,603000	6,871000	0,033840	0,0011900000	0,986140	2,24E-02
Verossimilhança Modificado	3,578000	6,870000	0,033650	0,0011700000	0,986290	2,38E-02
Energia Equivalente	3,675000	6,831630	0,034110	0,0012100000	0,985910	8,66E-07

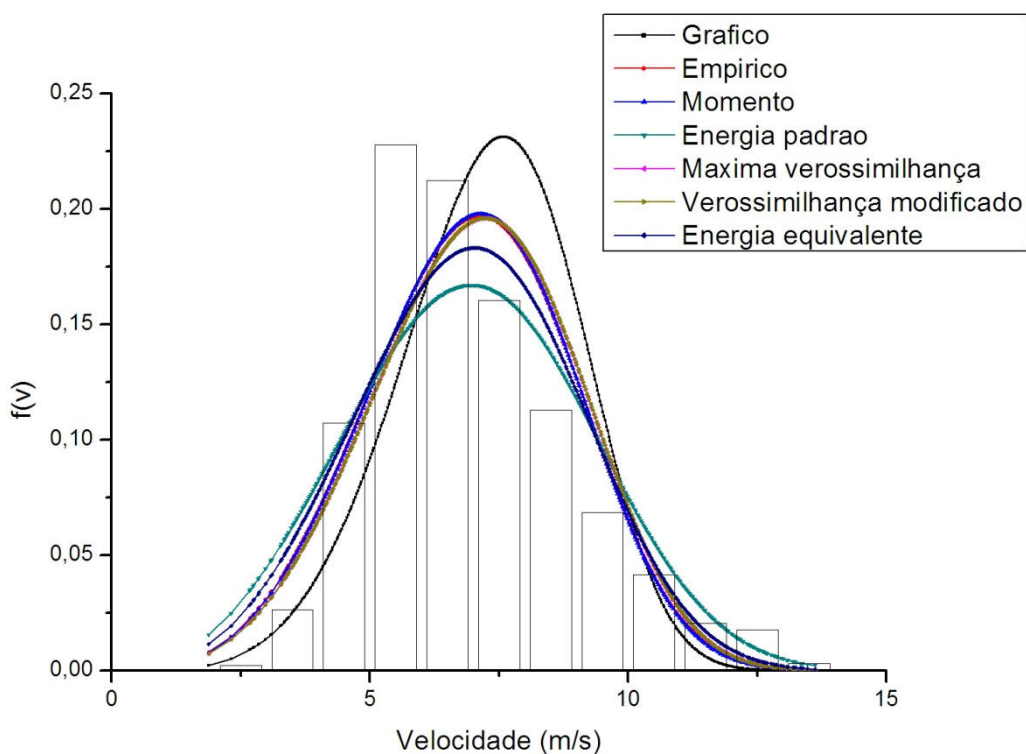


Figura 23- Distribuição de Weibull – Camocim Junho de 2005

Tabela 20- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Jun 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	4,886000	7,951000	0,065770	0,0044700000	0,895380	6,76E-02
Empírico	3,961620	7,674360	0,053950	0,0030100000	0,929590	1,26E-02
Momento	3,985060	7,671790	0,054240	0,0030400000	0,928850	1,47E-02
Energia Padrão	3,345620	7,745040	0,047040	0,0022900000	0,946490	5,89E-02
Máxima Verossimilhança	3,998000	7,770000	0,054340	0,0030500000	0,928590	2,30E-02
Verossimilhança Modificado	4,001000	7,774000	0,054370	0,0030600000	0,928500	2,45E-02
Energia Equivalente	3,660000	7,662640	0,050480	0,0026400000	0,938360	2,86E-07

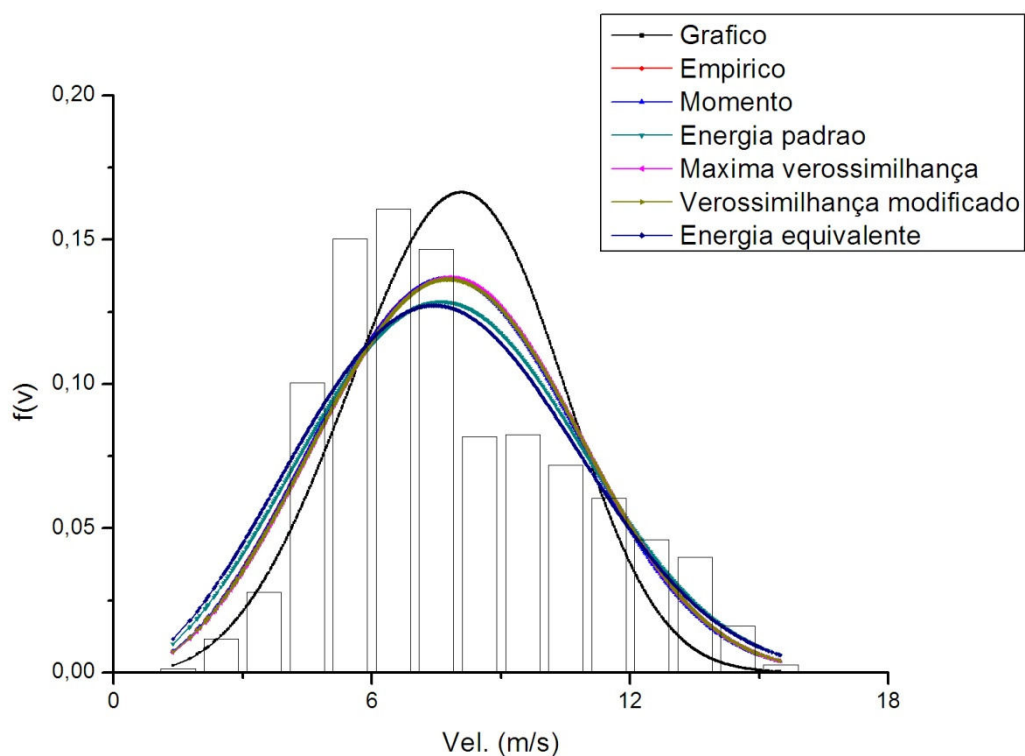


Figura 24– Distribuição de Weibull – Camocim Julho de 2005

Tabela 21- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Jul 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,812000	8,754000	0,048420	0,0024300000	0,906090	8,78E-02
Empírico	3,079000	8,799870	0,038600	0,0015400000	0,940330	1,20E-02
Momento	3,079400	8,799820	0,038610	0,0015400000	0,940310	1,21E-02
Energia Padrão	2,878600	8,825590	0,036170	0,0013500000	0,947590	2,60E-02
Máxima Verossimilhança	3,104000	8,850000	0,038810	0,0015600000	0,939660	1,76E-03
Verossimilhança Modificado	3,086000	8,844000	0,038600	0,0015400000	0,940320	2,00E-03
Energia Equivalente	2,800000	8,713920	0,035590	0,0013100000	0,949270	8,92E-04

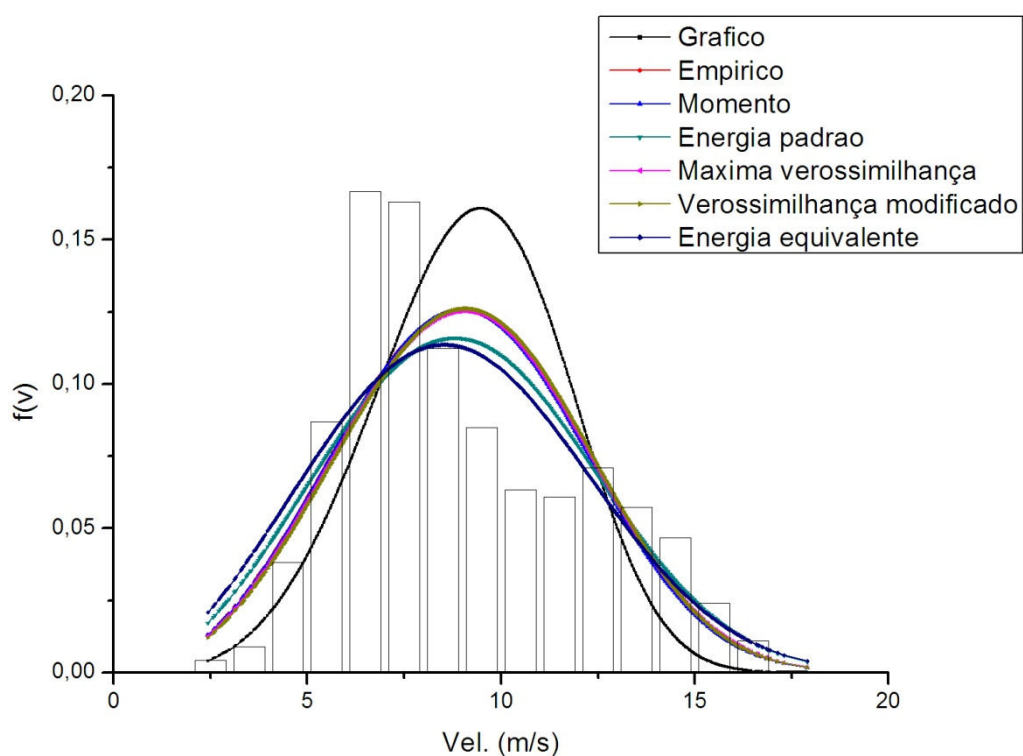


Figura 25- Distribuição de Weibull – Camocim Agosto de 2005

Tabela 22- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Ago 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	4,278000	10,080000	0,044470	0,0020400000	0,940040	6,77E-02
Empírico	3,253110	10,058090	0,032050	0,0010600000	0,968860	1,20E-02
Momento	3,258180	10,057320	0,032110	0,0010700000	0,968750	1,27E-02
Energia Padrão	2,987730	10,098160	0,029350	0,0008900160	0,973890	3,31E-02
Máxima Verossimilhança	3,270000	10,120000	0,032210	0,0010700000	0,968540	4,62E-03
Verossimilhança Modificado	3,300000	10,140000	0,032540	0,0010900000	0,967890	7,51E-03
Energia Equivalente	2,856000	9,921570	0,028390	0,0008326190	0,975570	5,52E-07

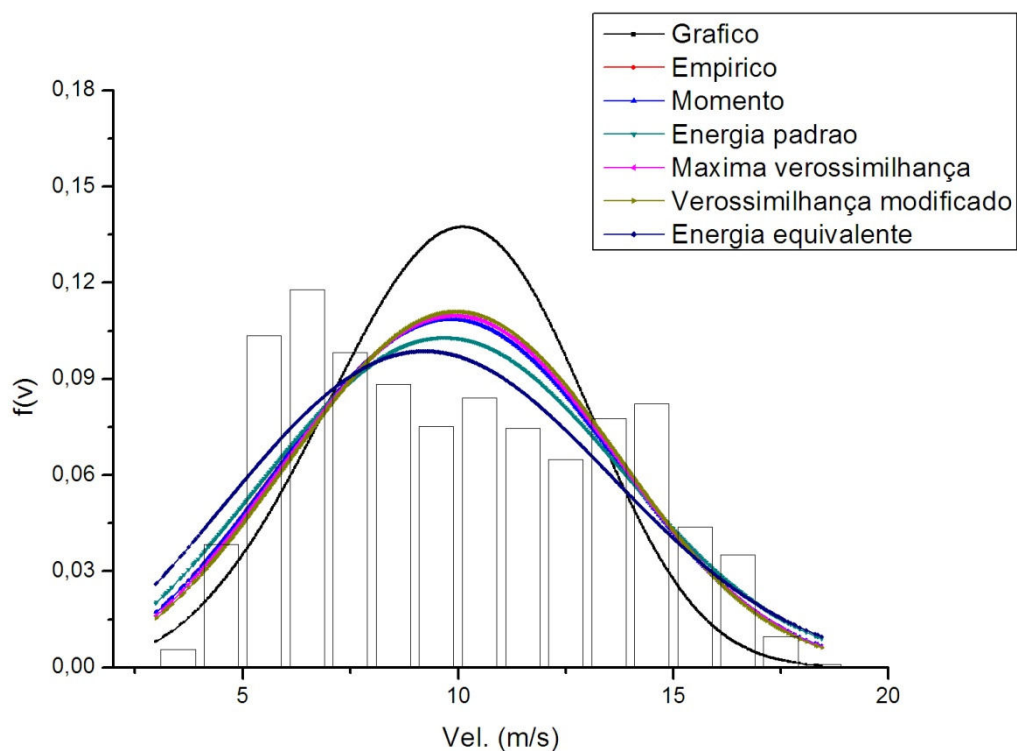


Figura 26- Distribuição de Weibull – Camocim Setembro de 2005



Tabela 23- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Set 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,929000	10,900000	0,039270	0,0016000000	0,923720	1,28E-01
Empírico	3,099120	11,142970	0,028210	0,0008232650	0,960640	3,35E-03
Momento	3,100060	11,142810	0,028220	0,0008239230	0,960610	3,51E-03
Energia Padrão	2,925070	11,171500	0,026210	0,0007104190	0,966040	2,90E-02
Máxima Verossimilhança	3,150000	11,180000	0,028720	0,0008530200	0,959220	3,93E-04
Verossimilhança Modificado	3,200000	11,210000	0,029240	0,0008842910	0,957730	2,68E-03
Energia Equivalente	2,710000	10,928840	0,024700	0,0006313070	0,969820	4,79E-04

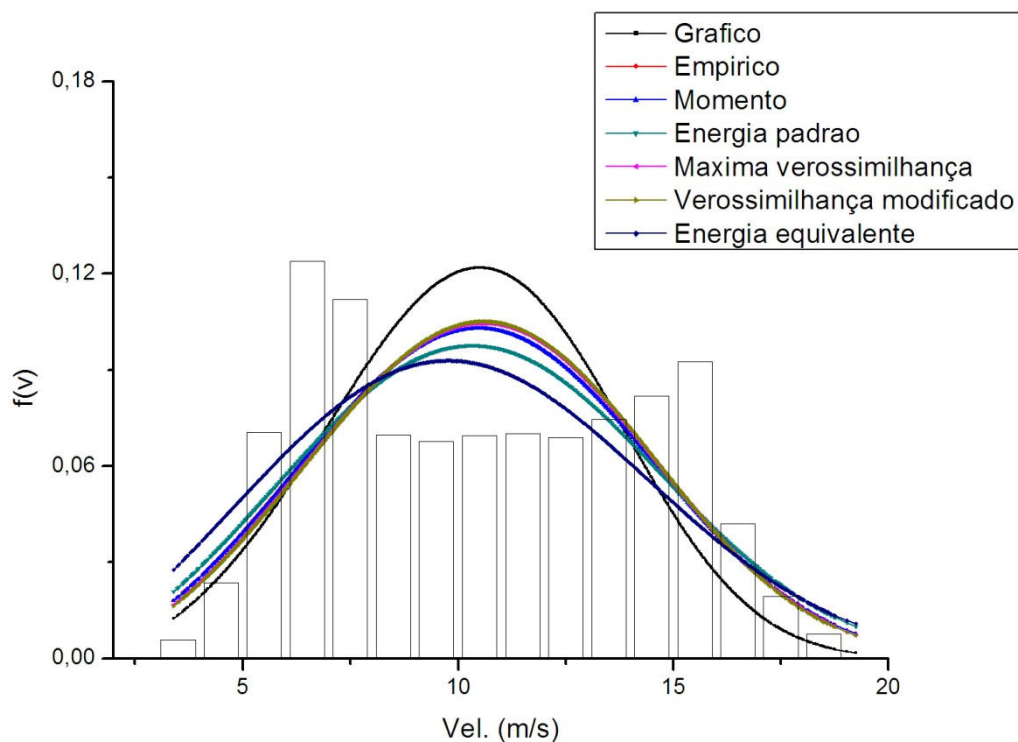


Figura 27– Distribuição de Weibull – Camocim Outubro de 2005

Tabela 24- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Out 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,645000	11,470000	0,034920	0,0012600000	0,941820	1,35E-01
Empírico	3,130000	11,849280	0,027670	0,0007922990	0,963450	6,35E-04
Momento	3,131770	11,848960	0,027690	0,0007934410	0,963400	9,30E-04
Energia Padrão	2,955810	11,879860	0,025800	0,0006884230	0,968240	3,10E-02
Máxima Verossimilhança	3,200100	11,890000	0,028340	0,0008306890	0,961680	1,50E-03
Verossimilhança Modificado	3,220000	11,902000	0,028530	0,0008418640	0,961170	2,33E-03
Energia Equivalente	2,705000	11,590590	0,024280	0,0006096790	0,971880	1,25E-06

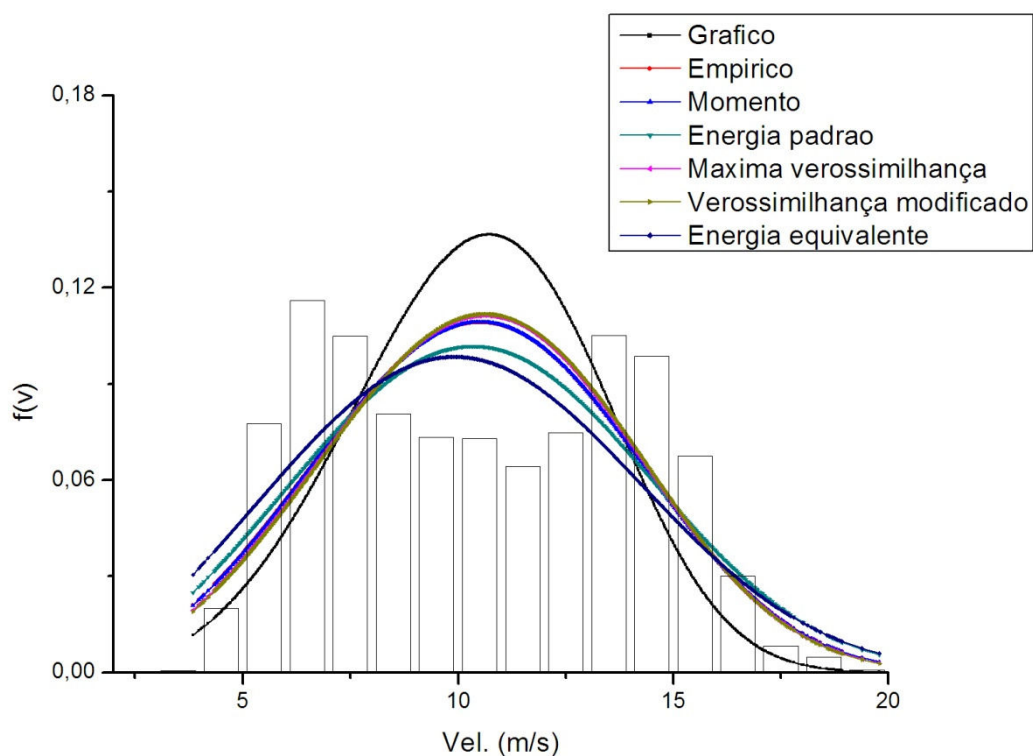


Figura 28– Distribuição de Weibull – Camocim Novembro de 2005

Tabela 25- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Nov 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	4,124000	11,470000	0,038260	0,0015200000	0,940030	1,12E-01
Empírico	3,303990	11,722780	0,027740	0,0007970560	0,968470	1,24E-04
Momento	3,310430	11,721630	0,027810	0,0008011530	0,968310	1,06E-03
Energia Padrão	3,066550	11,764890	0,025280	0,0006618800	0,973820	3,85E-02
Máxima Verossimilhança	3,390000	11,760000	0,028550	0,0008440450	0,966610	1,24E-03
Verossimilhança Modificado	3,410000	11,776000	0,028720	0,0008540500	0,966220	3,54E-03
Energia Equivalente	2,875000	11,509910	0,024350	0,0006140240	0,975710	9,55E-07

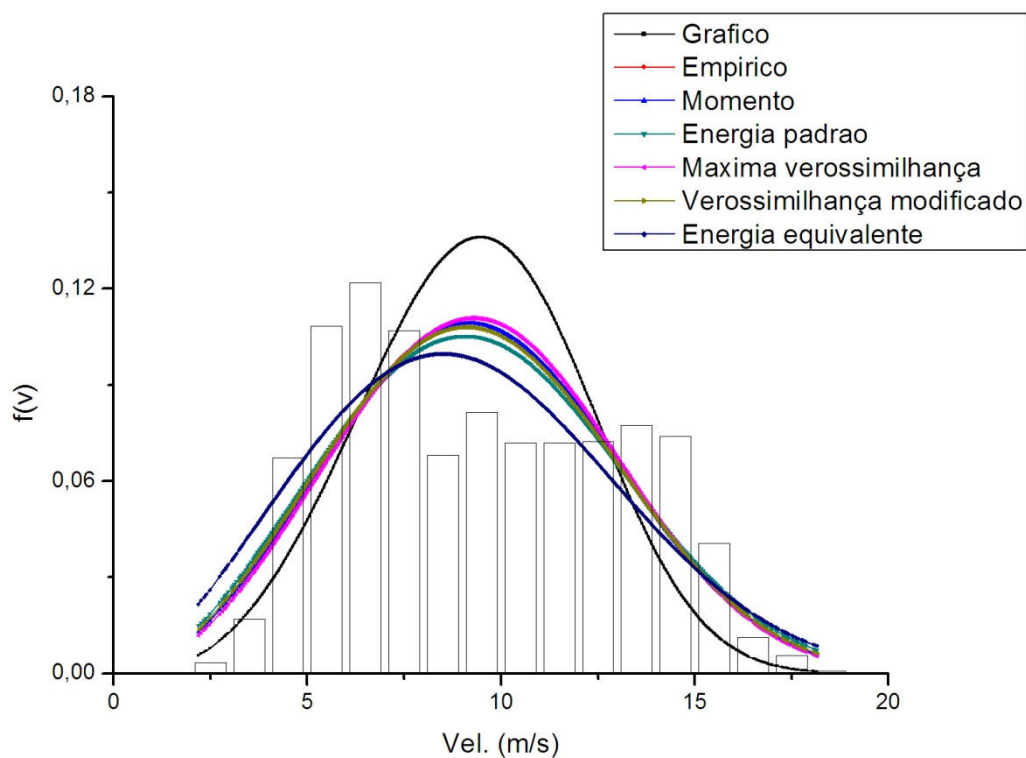


Figura 29– Distribuição de Weibull – Camocim Dezembro de 2005

Tabela 26- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Dez 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,667000	10,330000	0,038840	0,0015600000	0,927340	1,36E-01
Empírico	2,941930	10,570530	0,028650	0,0008478910	0,960470	2,62E-03
Momento	2,938680	10,571020	0,028600	0,0008455080	0,960580	1,99E-03
Energia Padrão	2,820680	10,588600	0,027180	0,0007635750	0,964400	2,24E-02
Máxima Verossimilhança	3,001000	10,610000	0,029260	0,0008846840	0,958750	5,74E-05
Verossimilhança Modificado	2,897000	10,560000	0,028140	0,0008181400	0,961860	1,35E-03
Energia Equivalente	2,560000	10,324090	0,025250	0,0006586260	0,969290	3,87E-07

### 5.2.2 Distribuição de Weibull – (Paracuru-Ce 2005)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros mensais para cada mês referente ao ano de 2005 para a cidade a Paracuru -Ce seguindo a ordem cronológica dos dados coletados nesta localidade.

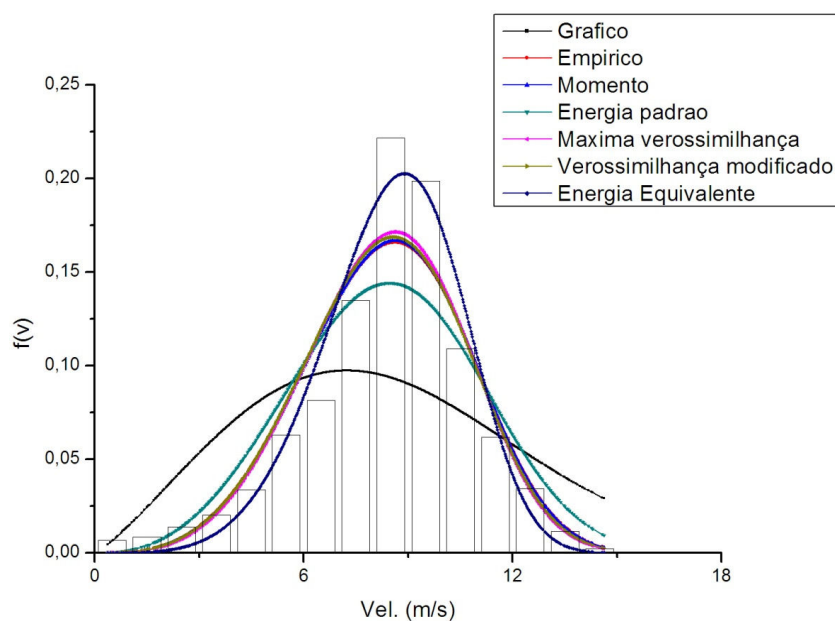


Figura 30– Distribuição de Weibull – Paracuru Janeiro de 2005

Tabela 27- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Jan 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,221000	9,480000	0,037020	0,001420	0,962650	4,28E-01
Empírico	4,028600	9,250460	0,043040	0,001920	0,949490	1,14E-02
Momento	4,053630	9,247190	0,043230	0,001930	0,949060	9,24E-03
Energia Padrão	3,490750	9,323970	0,039570	0,001620	0,957320	7,03E-02
Máxima Verossimilhança	4,153000	9,205000	0,044140	0,002020	0,946890	8,61E-03
Verossimilhança Modificado	4,078000	9,194000	0,043680	0,001970	0,947990	9,12E-03
Energia Equivalente	5,012000	9,298980	0,050300	0,002620	0,931050	6,72E-07

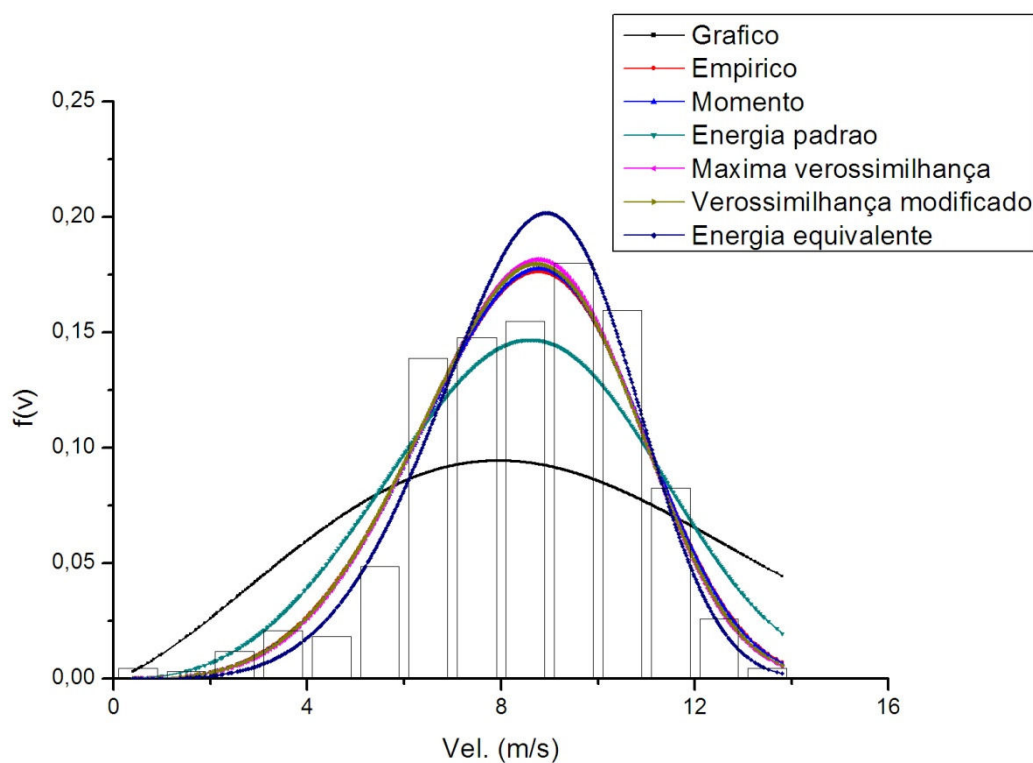


Figura 31– Distribuição de Weibull – Paracuru Fevereiro de 2005

Tabela 28- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Fev 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,327000	10,125000	0,033470	0,001160	0,963920	6,54E-01
Empírico	4,335670	9,318420	0,047650	0,002350	0,926850	8,69E-03
Momento	4,367770	9,314440	0,047960	0,002380	0,925890	6,37E-03
Energia Padrão	3,601260	9,416500	0,041280	0,001760	0,945110	7,92E-02
Máxima Verossimilhança	4,451000	9,274000	0,048980	0,002480	0,922710	9,14E-03
Verossimilhança Modificado	4,398000	9,267400	0,048540	0,002440	0,924100	9,71E-03
Energia Equivalente	5,010000	9,339250	0,053920	0,003010	0,906320	7,29E-05

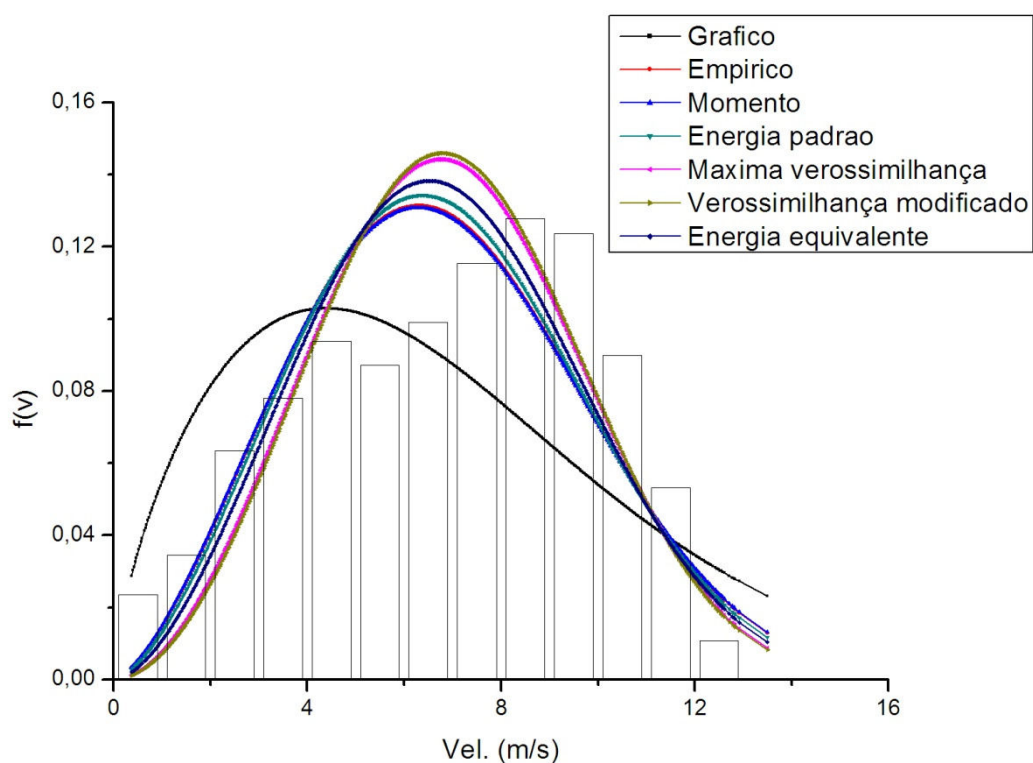


Figura 32- Distribuição de Weibull – Paracuru Março de 2005

Tabela 29- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Mar 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	1,676000	7,545000	0,039950	0,001650	0,859710	4,54E-01
Empírico	2,514280	7,718490	0,046670	0,002250	0,808500	2,81E-02
Momento	2,500350	7,719560	0,046490	0,002240	0,810020	3,22E-02
Energia Padrão	2,580340	7,713070	0,047570	0,002340	0,801060	9,37E-03
Máxima Verossimilhança	2,867000	7,840000	0,050450	0,002630	0,776220	1,58E-03
Verossimilhança Modificado	2,912000	7,854000	0,050960	0,002690	0,771680	3,00E-04
Energia Equivalente	2,690000	7,751170	0,048730	0,002460	0,791210	1,35E-06

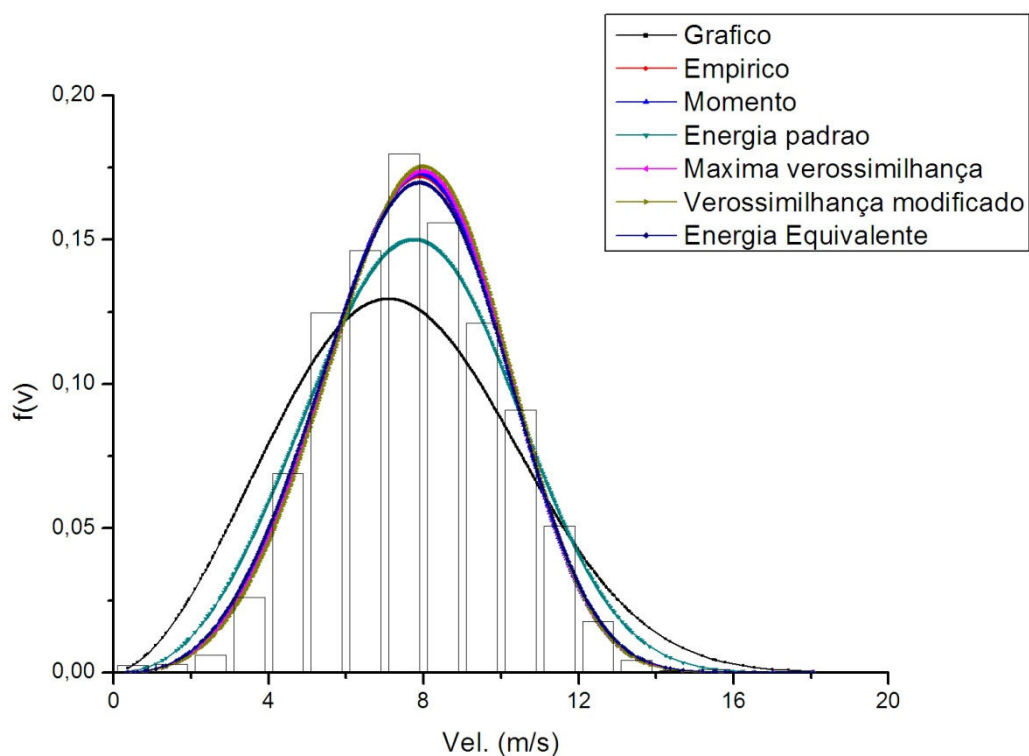


Figura 33– Distribuição de Weibull – Paracuru Abril de 2005

Tabela 30- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Abr 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,733000	8,390000	0,024280	0,000609	0,987400	6,18E-02
Empírico	3,852250	8,559350	0,029580	0,000904	0,981300	1,34E-03
Momento	3,872990	8,556770	0,029790	0,000917	0,981030	3,36E-03
Energia Padrão	3,350190	8,623960	0,025240	0,000658	0,986390	5,93E-02
Máxima Verossimilhança	3,916400	8,593000	0,030100	0,000936	0,980630	7,08E-03
Verossimilhança Modificado	3,962000	8,611000	0,030510	0,000962	0,980110	1,11E-02
Energia Equivalente	3,800050	8,554840	0,029100	0,000875	0,981900	4,11E-07

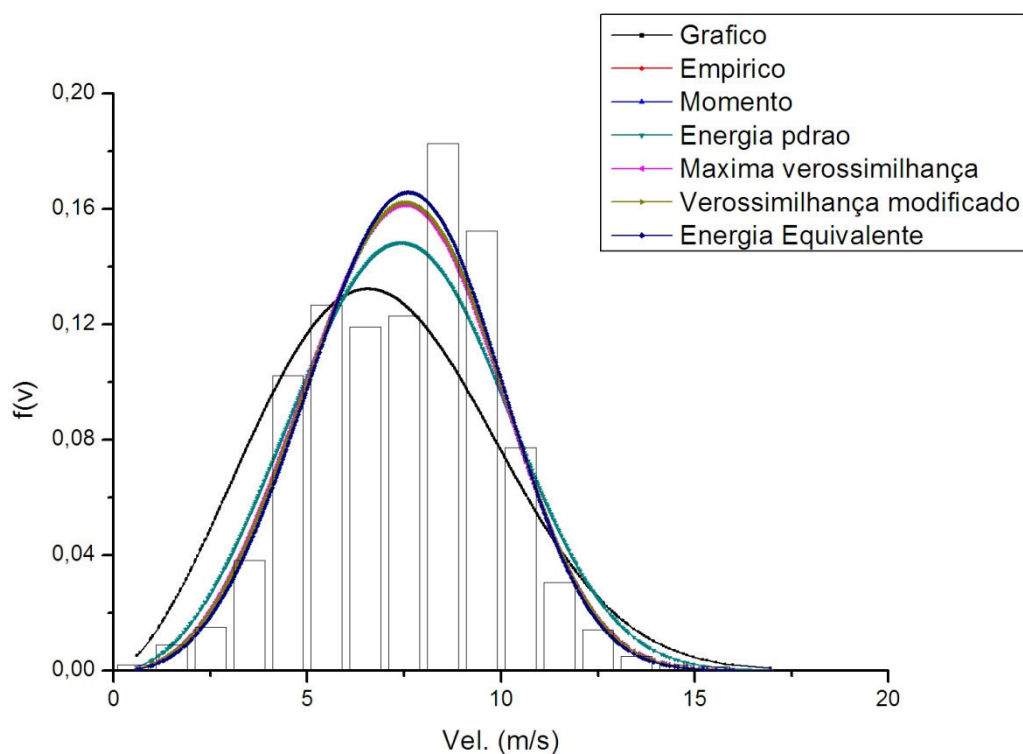


Figura 34– Distribuição de Weibull – Paracuru Maio de 2005



Tabela 31- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Mai 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,733000	8,390000	0,024280	0,000609	0,987400	6,18E-02
Empírico	3,487660	8,319350	0,027550	0,000784	0,983780	6,04E-02
Momento	3,498990	8,317920	0,027650	0,000790	0,983660	6,18E-02
Energia Padrão	3,188370	8,357280	0,025430	0,000668	0,986180	1,97E-02
Máxima Verossimilhança	3,476500	8,300000	0,027590	0,000787	0,983730	6,61E-02
Verossimilhança Modificado	3,500100	8,311000	0,027700	0,000793	0,983600	6,42E-02
Energia Equivalente	3,595000	8,332030	0,028330	0,000829	0,982850	6,38E-02

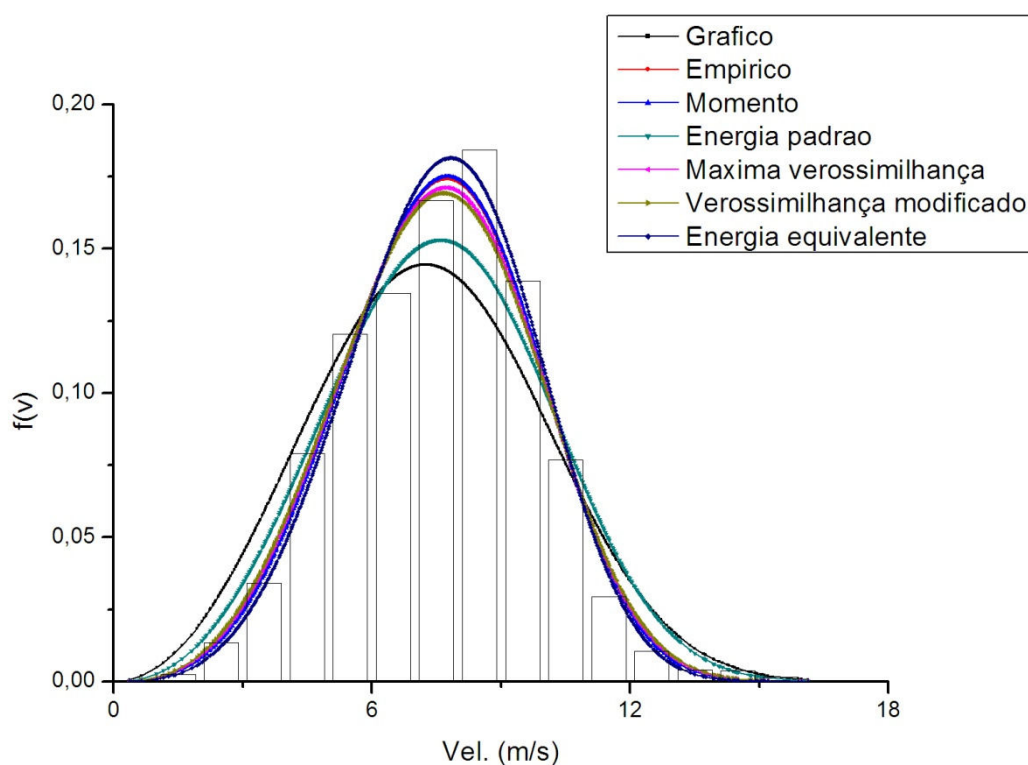


Figura 35– Distribuição de Weibull – Paracuru Junho de 2005

Tabela 32- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Jun 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,053000	8,260000	0,031760	0,001040	0,974910	2,31E-02
Empírico	3,823520	8,385580	0,036900	0,001410	0,966130	1,58E-05
Momento	3,843530	8,383130	0,037100	0,001420	0,965770	2,00E-03
Energia Padrão	3,343050	8,446260	0,032650	0,001100	0,973490	5,87E-02
Máxima Verossimilhança	3,743500	8,370000	0,036250	0,001360	0,967320	9,01E-04
Verossimilhança Modificado	3,694000	8,361000	0,035850	0,001330	0,968030	1,02E-03
Energia Equivalente	4,010000	8,412170	0,038550	0,001540	0,963040	3,89E-07

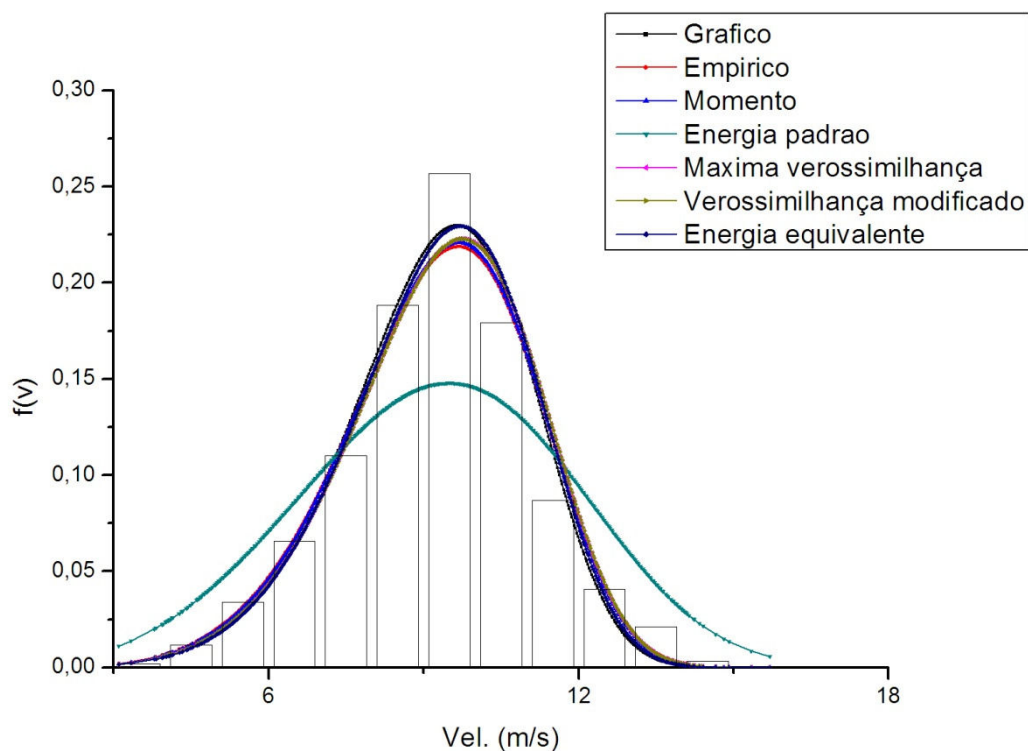


Figura 36– Distribuição de Weibull – Paracuru Julho de 2005

Tabela 33- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Jul 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	6,116000	9,931000	0,046100	0,002200	0,962040	1,94E-02
Empírico	5,851110	9,994010	0,044130	0,002010	0,965210	2,70E-04
Momento	5,907370	9,988690	0,044530	0,002050	0,964590	1,55E-03
Energia Padrão	3,968680	10,219340	0,034730	0,001250	0,978460	1,10E-01
Máxima Verossimilhança	6,002000	10,050000	0,045120	0,002110	0,963640	1,66E-02
Verossimilhança Modificado	5,997000	10,050000	0,045090	0,002100	0,963690	1,66E-02
Energia Equivalente	6,150000	9,996160	0,046210	0,002210	0,961860	1,19E-07

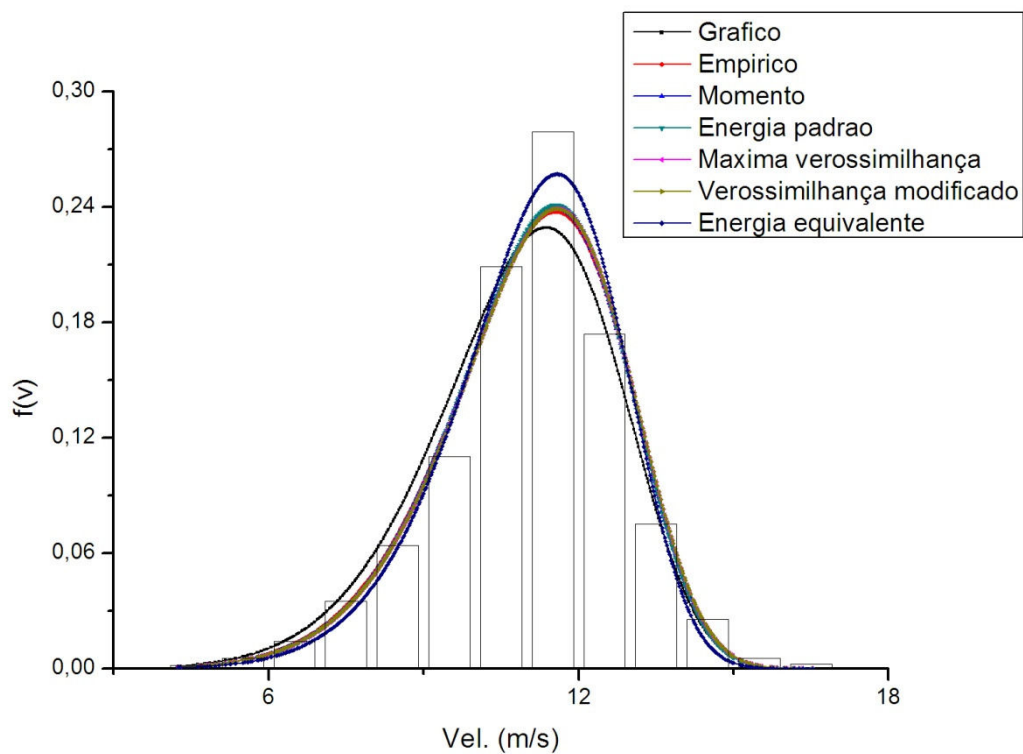


Figura 37– Distribuição de Weibull – Paracuru Agosto de 2005

Tabela 34- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Ago 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	7,161000	11,614000	0,039890	0,001650	0,977340	4,20E-02
Empírico	7,526320	11,780820	0,041110	0,001750	0,975930	9,44E-04
Momento	7,586910	11,776090	0,041420	0,001770	0,975570	5,65E-05
Energia Padrão	7,647270	11,771440	0,041720	0,001800	0,975210	1,03E-03
Máxima Verossimilhança	7,601200	11,800000	0,041480	0,001780	0,975500	6,10E-03
Verossimilhança Modificado	7,593400	11,799000	0,041440	0,001780	0,975550	5,81E-03
Energia Equivalente	8,156000	11,767600	0,044390	0,002040	0,971930	1,00E-06

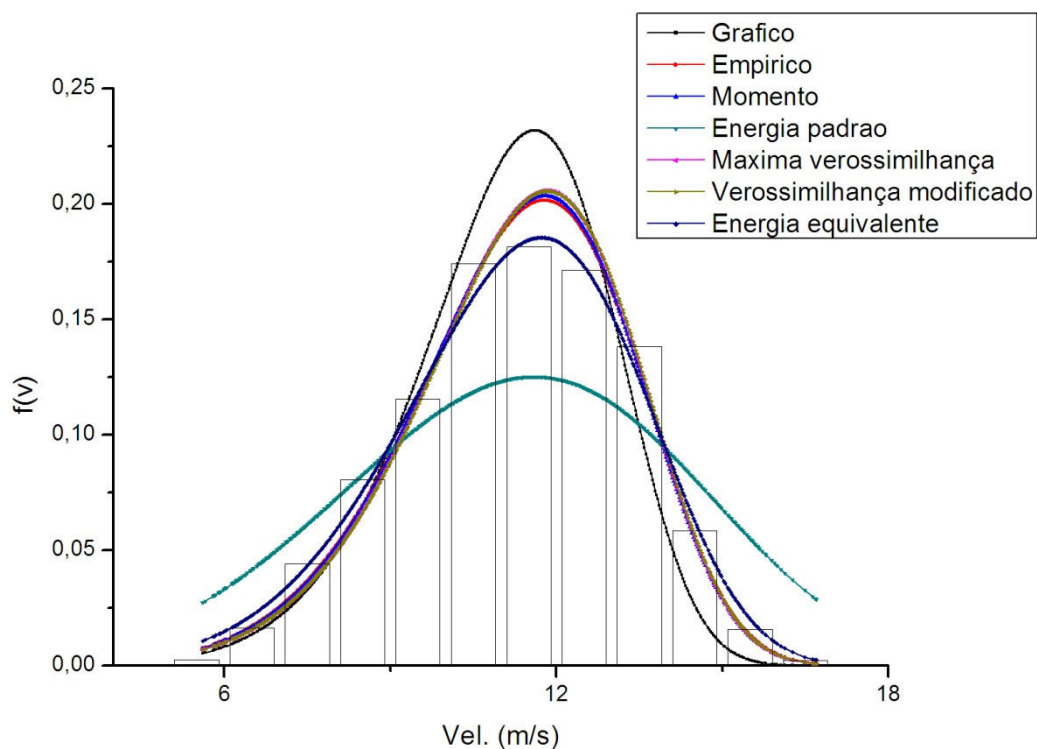


Figura 38– Distribuição de Weibull – Paracuru Outubro de 2005

Tabela 35- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Out 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	7,388000	11,840000	0,046680	0,002250	0,954030	5,89E-02
Empírico	6,541340	12,090540	0,038850	0,001560	0,968150	5,67E-04
Momento	6,602220	12,084550	0,039300	0,001600	0,967400	8,99E-04
Energia Padrão	4,088880	12,417690	0,027390	0,000776	0,984170	1,21E-01
Máxima Verossimilhança	6,700000	12,120000	0,039860	0,001640	0,966480	7,99E-03
Verossimilhança Modificado	6,694000	12,130000	0,039780	0,001640	0,966610	1,05E-02
Energia Equivalente	6,000000	12,085440	0,035220	0,001280	0,973830	2,98E-07

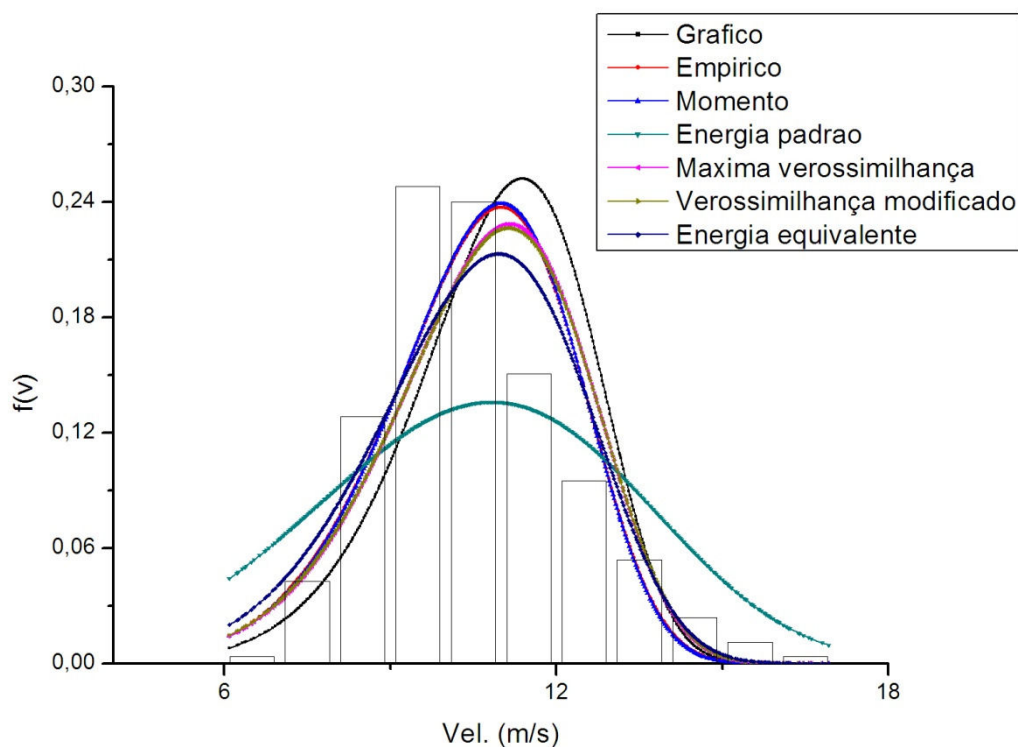


Figura 39– Distribuição de Weibull – Paracuru Novembro de 2005

Tabela 36- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Nov 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	7,870000	11,586000	0,054750	0,003100	0,956630	9,62E-02
Empírico	7,165680	11,233230	0,046150	0,002210	0,969190	3,22E-03
Momento	7,227290	11,228290	0,046560	0,002240	0,968640	4,38E-03
Energia Padrão	4,149190	11,582830	0,034180	0,001210	0,983100	1,26E-01
Máxima Verossimilhança	7,002000	11,397000	0,046270	0,002220	0,969030	4,06E-02
Verossimilhança Modificado	6,934000	11,392000	0,045730	0,002170	0,969740	3,91E-02
Energia Equivalente	6,430000	11,248670	0,041200	0,001760	0,975440	7,84E-07

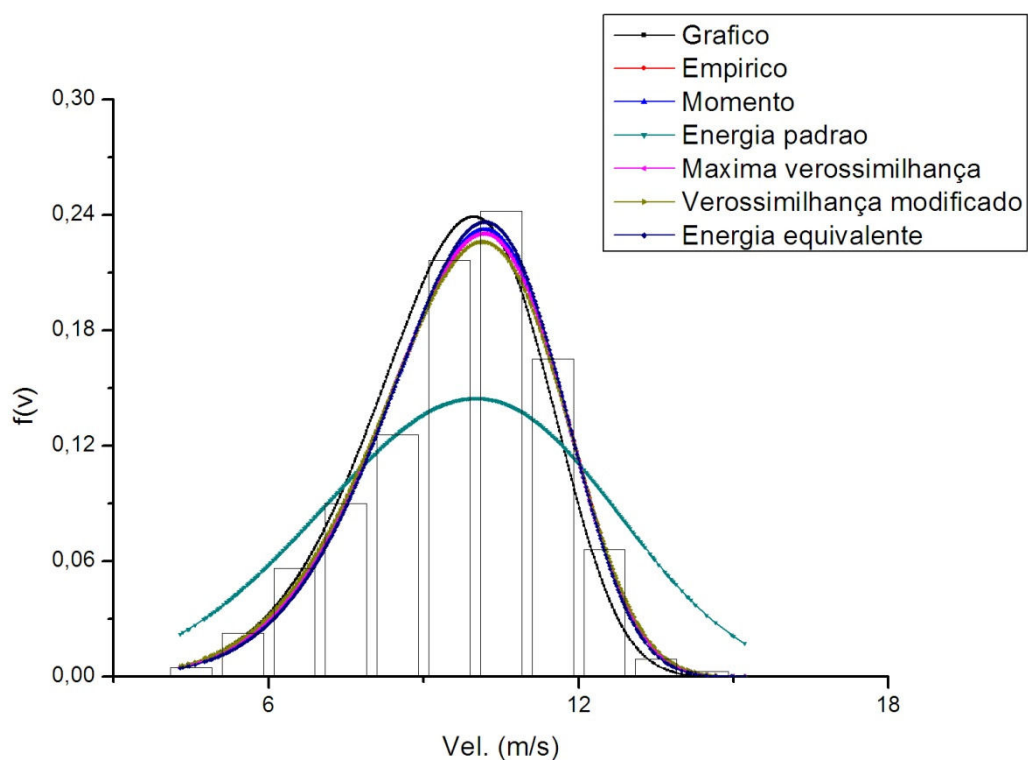


Figura 40– Distribuição de Weibull – Paracuru Dezembro de 2005

Tabela 37- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Dez 2005

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	6,557000	10,220000	0,050160	0,002600	0,953600	6,24E-02
<i>Empírico</i>	6,455990	10,447390	0,047500	0,002330	0,958400	1,56E-03
<i>Momento</i>	6,516510	10,442150	0,047960	0,002380	0,957590	4,69E-05
<i>Energia Padrão</i>	4,081930	10,723560	0,035370	0,001290	0,976930	1,20E-01
<i>Máxima Verossimilhança</i>	6,443000	10,430000	0,047520	0,002340	0,958370	3,43E-03
<i>Verossimilhança Modificado</i>	6,315000	10,422000	0,046680	0,002250	0,959830	5,65E-03
<i>Energia Equivalente</i>	6,625000	10,441860	0,048730	0,002460	0,956220	3,59E-07

### 5.3 Curvas e Tabelas Mensais – 2006

Abaixo seguem as distribuições de Weibull, através de curvas mensais, elaboradas a partir de dados coletados nas cidades de Camocim e Paracuru referentes ao período de coleta de 2006, além das tabelas com os erros calculados para cada método numérico utilizado na determinação destas respectivas curvas. Verifica-se primeiramente a distribuição de Weibull referente a cada período e localidade, seguido-se das respectivas tabelas com os resultados dos erros por localidade e período de coleta de dados.

#### 5.3.1 Distribuição de Weibull – (Camocim-Ce 2006)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros mensais para cada mês referente ao ano de 2006 para a cidade a Camocim-Ce seguindo a ordem cronológica dos dados coletados nesta localidade.

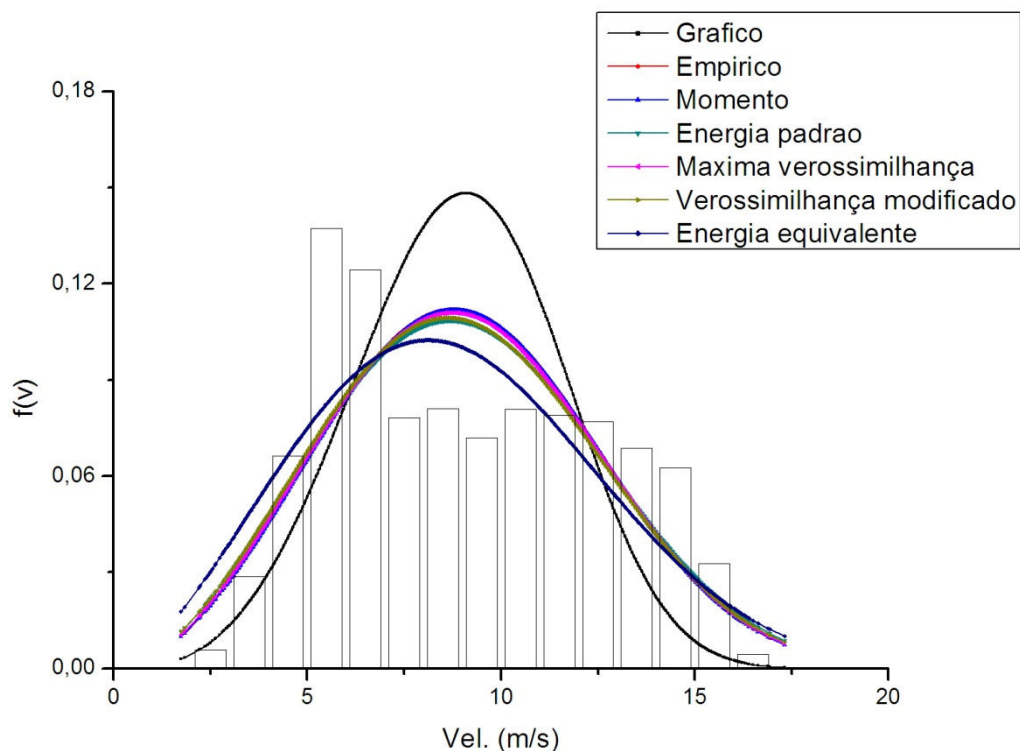


Figura 41– Distribuição de Weibull – Camocim Janeiro de 2006

Tabela 38- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Jan 2006

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	3,819000	9,840000	0,045580	0,002150	0,891400	1,75E-01
<i>Empírico</i>	2,894670	10,172560	0,031820	0,001050	0,947080	1,74E-03
<i>Momento</i>	2,890180	10,173210	0,031760	0,001040	0,947280	8,30E-04
<i>Energia Padrão</i>	2,790070	10,187310	0,030490	0,000962	0,951390	2,06E-02
<i>Máxima Verossimilhança</i>	2,857000	10,160000	0,031390	0,001020	0,948500	7,06E-04
<i>Verossimilhança Modificado</i>	2,798000	10,130000	0,030760	0,000979	0,950540	2,05E-03
<i>Energia Equivalente</i>	2,520000	9,923910	0,028390	0,000834	0,957870	4,40E-07



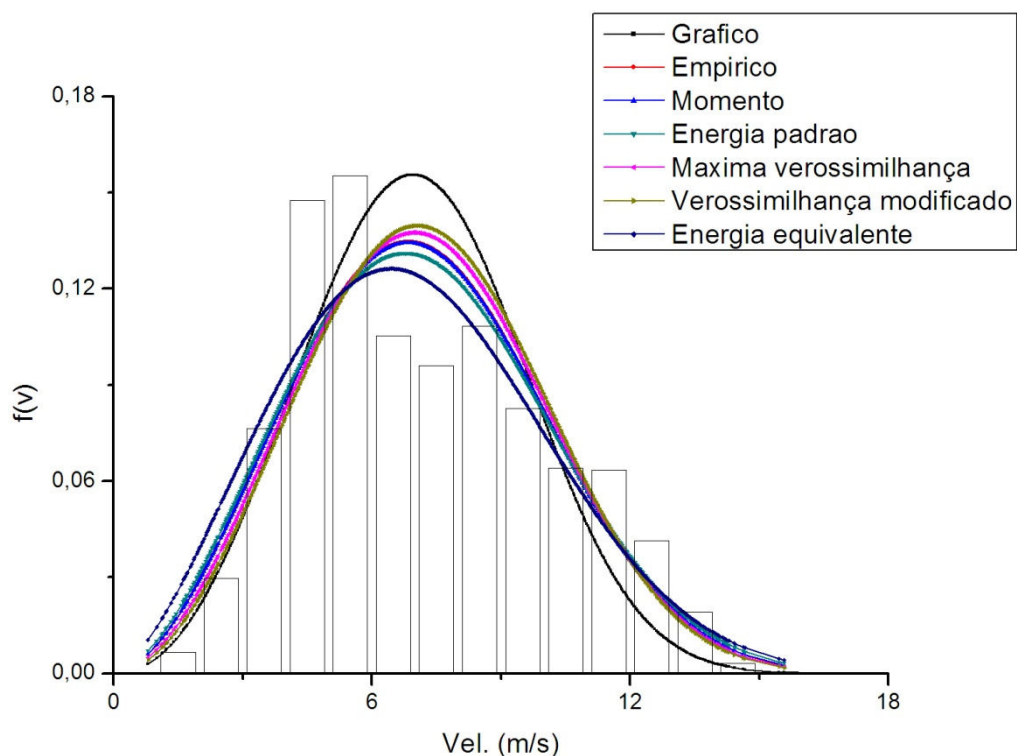


Figura 42– Distribuição de Weibull – Camocim Fevereiro de 2006

Tabela 39- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Fev 2006

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	3,139000	7,860000	0,043910	0,001990	0,915470	1,41E-01
Empírico	2,743210	8,085280	0,037240	0,001430	0,939190	6,75E-03
Momento	2,734830	8,086160	0,037120	0,001430	0,939570	4,82E-03
Energia Padrão	2,659780	8,093820	0,036090	0,001350	0,942880	1,34E-02
Máxima Verossimilhança	2,834000	8,142500	0,038290	0,001520	0,935700	2,10E-03
Verossimilhança Modificado	2,902100	8,179500	0,039140	0,001580	0,932820	2,66E-04
Energia Equivalente	2,478000	7,941950	0,034480	0,001230	0,947860	9,25E-07

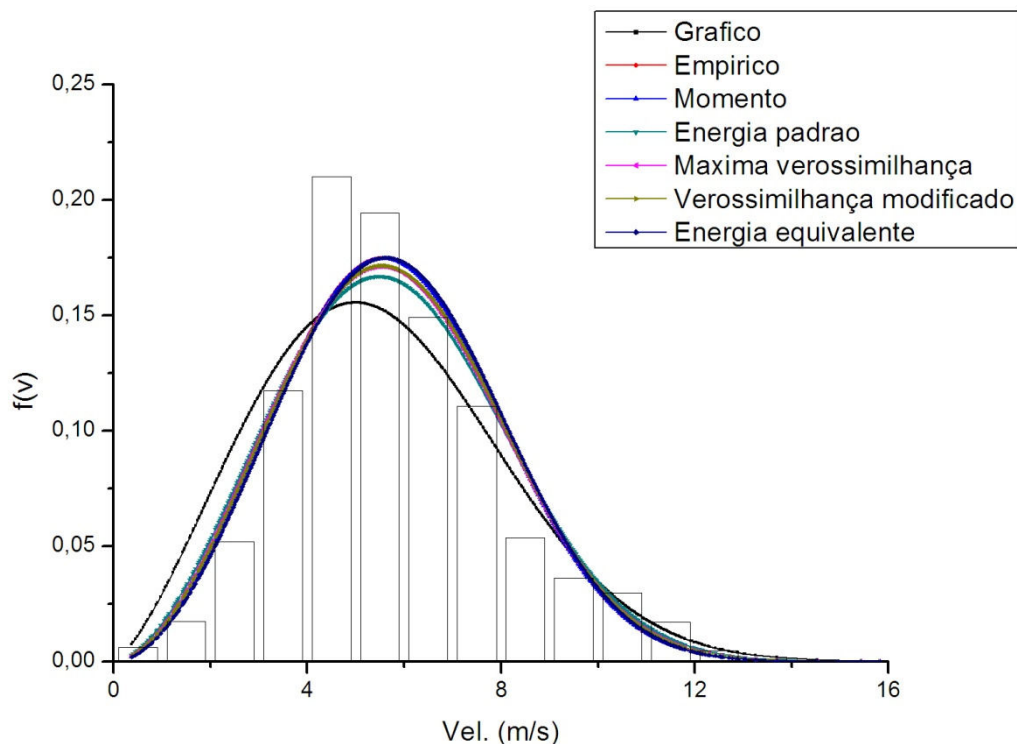


Figura 43– Distribuição de Weibull – Camocim Março de 2006

Tabela 40- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Mar 2006

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,391000	6,272000	0,036240	0,001360	0,969980	4,10E-03
Empírico	2,873830	6,476830	0,039350	0,001600	0,964610	1,60E-02
Momento	2,868800	6,477290	0,039290	0,001600	0,964720	1,49E-02
Energia Padrão	2,724700	6,489910	0,037720	0,001470	0,967480	1,69E-02
Máxima Verossimilhança	2,798900	6,477960	0,038520	0,001540	0,966070	2,72E-03
Verossimilhança Modificado	2,813000	6,490000	0,038630	0,001540	0,965880	3,37E-04
Energia Equivalente	2,896000	6,519440	0,039460	0,001610	0,964400	8,25E-07

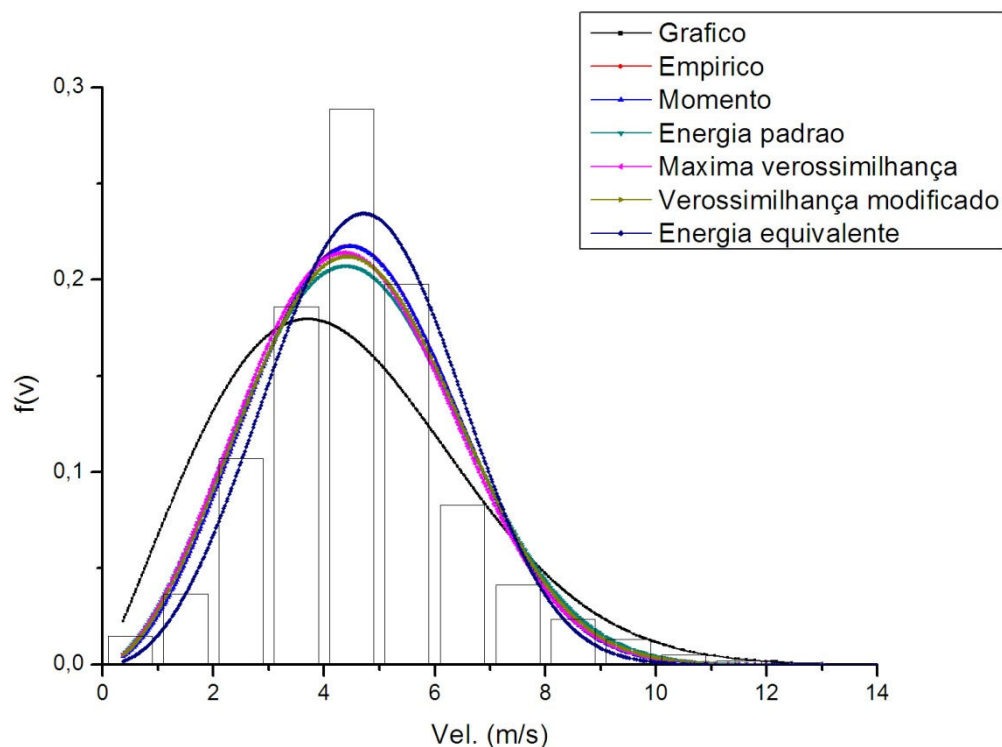


Figura 44– Distribuição de Weibull – Camocim Abril de 2006

Tabela 41- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Camocim Abr 2006

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,132000	4,990000	0,041430	0,001780	0,974240	6,44E-02
Empírico	2,867820	5,194750	0,043110	0,001920	0,972120	1,82E-02
Momento	2,862630	5,195130	0,043060	0,001920	0,972180	1,71E-02
Energia Padrão	2,712720	5,205600	0,041710	0,001800	0,973890	1,62E-02
Máxima Verossimilhança	2,767800	5,128420	0,042670	0,001880	0,972690	3,86E-02
Verossimilhança Modificado	2,782100	5,197300	0,042330	0,001850	0,973120	1,96E-03
Energia Equivalente	3,201000	5,306330	0,046230	0,002210	0,967940	1,35E-06

### 5.3.2 Distribuição de Weibull – (Paracuru-Ce 2006)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros mensais para cada mês referente ao ano de 2006 para a cidade a Paracuru -Ce seguindo a ordem cronológica dos dados coletados nesta localidade.

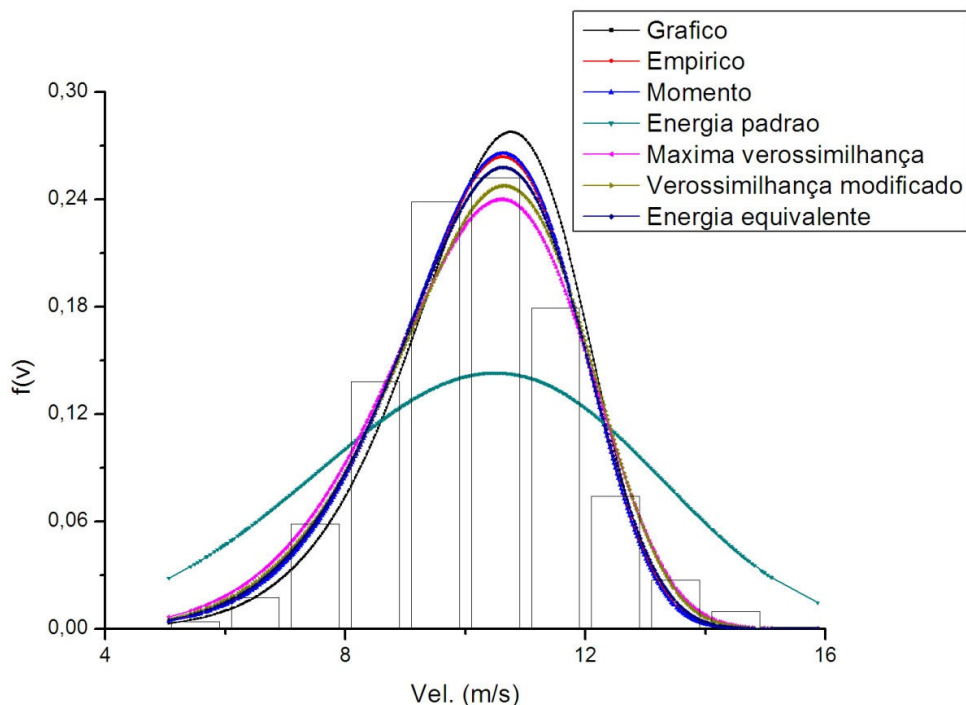


Figura 45– Distribuição de Weibull – Paracuru Janeiro de 2006

Tabela 42- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Jan 2006

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	8,183000	10,930000	0,053510	0,002970	0,957140	3,12E-02
Empírico	7,688380	10,822240	0,049680	0,002560	0,963050	9,87E-04
Momento	7,748190	10,818090	0,050100	0,002600	0,962440	1,92E-03
Energia Padrão	4,221140	11,187750	0,035460	0,001300	0,981190	1,32E-01
Máxima Verossimilhança	6,994300	10,838680	0,045030	0,002100	0,969660	1,57E-03
Verossimilhança Modificado	7,243000	10,874000	0,046740	0,002260	0,967300	1,20E-02
Energia Equivalente	7,520000	10,827910	0,048530	0,002440	0,964760	1,03E-06

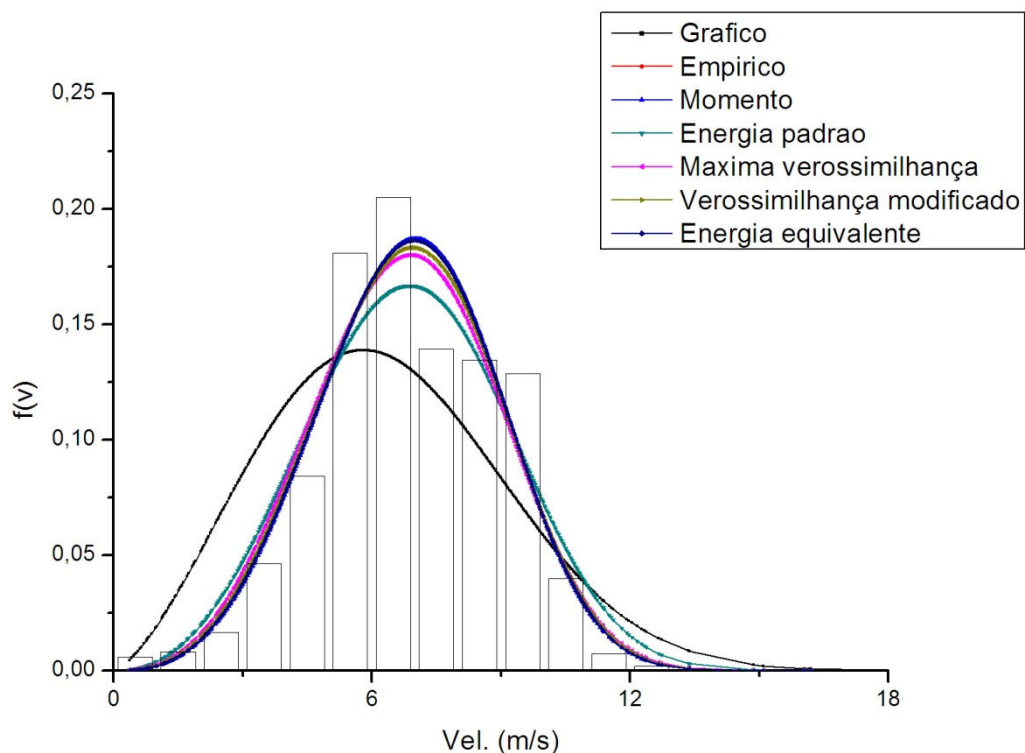


Figura 46– Distribuição de Weibull – Paracuru Fevereiro de 2006

Tabela 43- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Fev 2006

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	2,458000	7,181600	0,034950	0,001260	0,973870	4,50E-04
<i>Empírico</i>	3,712500	7,624950	0,038940	0,001570	0,967580	3,18E-03
<i>Momento</i>	3,729700	7,623010	0,039130	0,001580	0,967260	1,33E-03
<i>Energia Padrão</i>	3,304300	7,672100	0,034880	0,001260	0,973980	5,58E-02
<i>Máxima Verossimilhança</i>	3,546000	7,576340	0,037540	0,001460	0,969860	4,44E-03
<i>Verossimilhança Modificado</i>	3,631000	7,605000	0,038210	0,001510	0,968770	7,14E-04
<i>Energia Equivalente</i>	3,705000	7,615670	0,038910	0,001570	0,967620	5,82E-07

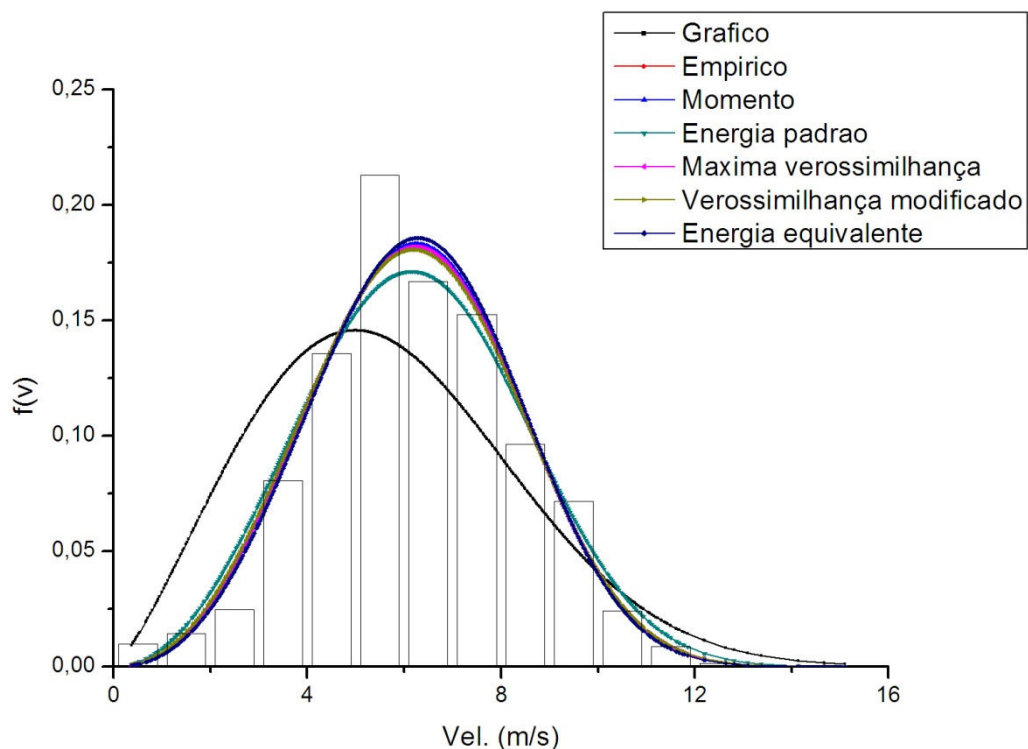


Figura 47– Distribuição de Weibull – Paracuru Março de 2006

Tabela 44- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Mar 2006

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b><math>\chi^2</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	2,274000	6,447400	0,039830	0,001640	0,960930	3,38E-02
<i>Empírico</i>	3,292420	6,977530	0,042680	0,001880	0,955130	1,92E-03
<i>Momento</i>	3,298550	6,976880	0,042750	0,001890	0,954980	1,03E-03
<i>Energia Padrão</i>	3,068030	7,001210	0,040240	0,001670	0,960120	3,86E-02
<i>Máxima Verossimilhança</i>	3,267800	6,966330	0,042470	0,001860	0,955560	3,85E-04
<i>Verossimilhança Modificado</i>	3,235100	6,954100	0,042190	0,001840	0,956150	2,21E-03
<i>Energia Equivalente</i>	3,355000	6,987220	0,043320	0,001940	0,953780	1,78E-06

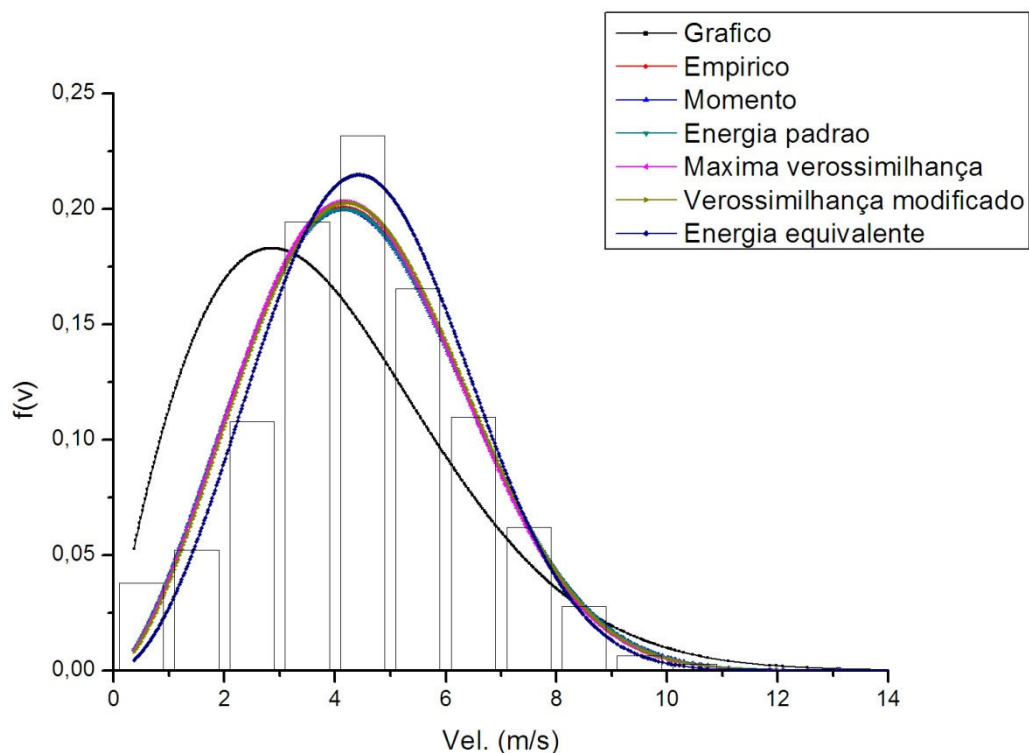


Figura 48– Distribuição de Weibull – Paracuru Abril de 2006

Tabela 45- Análise Estatística e Análise do Erro da Potência – Paracuru Abr 2006

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b><math>\chi^2</math></b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	1,822000	4,430000	0,052870	0,002890	0,936220	1,00E-01
<i>Empírico</i>	2,531370	5,085800	0,049420	0,002520	0,944270	4,53E-03
<i>Momento</i>	2,517840	5,086510	0,049250	0,002510	0,944640	8,40E-03
<i>Energia Padrão</i>	2,523580	5,086210	0,049320	0,002510	0,944480	6,75E-03
<i>Máxima Verossimilhança</i>	2,557000	5,058850	0,050010	0,002580	0,942930	1,76E-02
<i>Verossimilhança Modificado</i>	2,573000	5,100000	0,049770	0,002560	0,943470	2,72E-03
<i>Energia Equivalente</i>	2,812000	5,179400	0,052130	0,002810	0,937980	1,86E-06

## 5.4 Curvas e Tabelas Anuais – 2004

A seguir são mostradas as curvas com a distribuição de Weibull em base anual, além das tabelas com a determinação dos respectivos erros referentes ao ano de 2004 para as cidades de Camocim e Paracuru.

### 5.4.1 Distribuição de Weibull – (Camocim 2004)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros anuais referentes ao ano de 2004 para a cidade a Camocim–Ce, onde se pode observar a distribuição de Weibull a partir de cada método numérico utilizado para a determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$

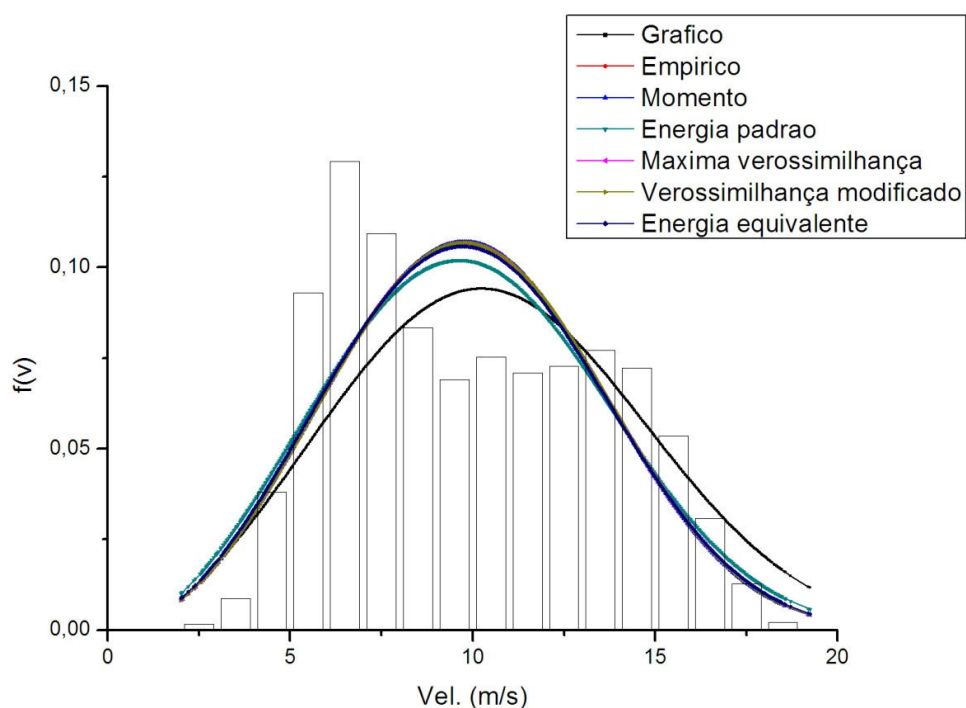


Figura 49– Distribuição de Weibull – Camocim Ano 2004



Tabela 46 – Análise Estatística e Análise da Potência – Camocim Ano 2004

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,842000	11,924000	0,027110	0,000756	0,960680	2,65E-01
Empírico	3,046930	11,126940	0,030570	0,000962	0,950000	3,70E-03
Momento	3,049000	11,126600	0,030590	0,000963	0,949930	4,07E-03
Energia Padrão	2,889060	11,152480	0,028810	0,000855	0,955580	2,67E-02
Máxima Verossimilhança	3,035860	11,135400	0,030420	0,000953	0,950470	5,48E-05
Verossimilhança Modificado	3,042500	11,141000	0,030480	0,000957	0,950280	6,70E-04
Energia Equivalente	3,003000	11,118410	0,030110	0,000933	0,951500	8,24E-07

#### 5.4.2 Distribuição de Weibull – (Paracuru - 2004)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros anuais referentes ao ano de 2004 para a cidade a Paracuru–Ce, onde se pode observar a distribuição de Weibull a partir de cada método numérico utilizado para a determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ .

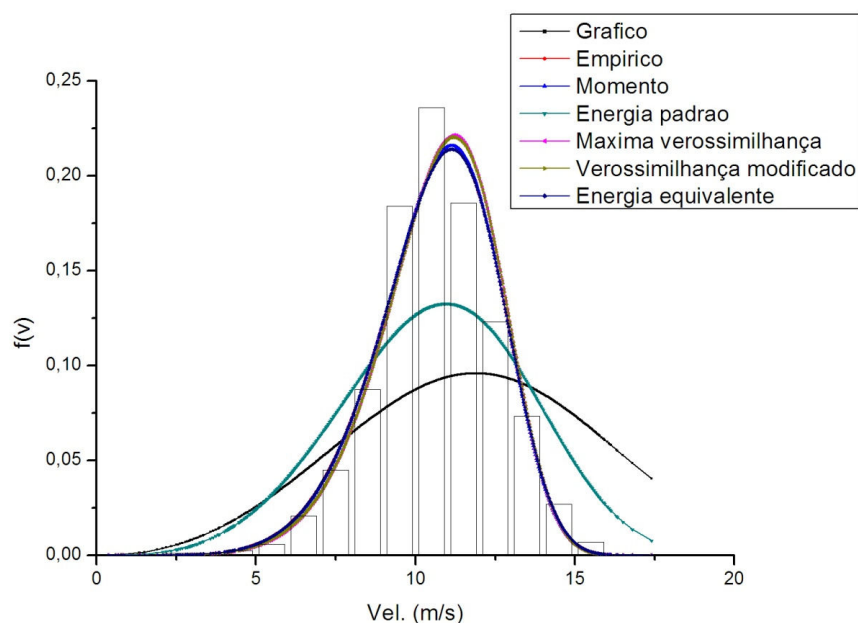


Figura 50– Distribuição de Weibull – Paracuru Ano 2004

Tabela 47 – Análise Estatística e Análise da Potência – Paracuru Ano 2004

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	3,285000	13,280000	0,034850	0,001250	0,976860	7,17E-01
<i>Empírico</i>	6,559600	11,420720	0,044500	0,002040	0,962280	7,72E-04
<i>Momento</i>	6,620000	11,415130	0,044890	0,002070	0,961600	6,71E-04
<i>Energia Padrão</i>	4,092890	11,730840	0,032920	0,001120	0,979350	1,21E-01
<i>Máxima Verossimilhança</i>	6,830000	11,483000	0,046280	0,002200	0,959210	1,74E-02
<i>Verossimilhança Modificado</i>	6,796000	11,480000	0,046050	0,002180	0,959610	1,66E-02
<i>Energia Equivalente</i>	6,557000	11,417790	0,044480	0,002040	0,962310	7,27E-07

## 5.5 Curvas e Tabelas Anuais – 2005

A seguir são mostradas as curvas com a distribuição de Weibull em base anual, além das tabelas com a determinação dos respectivos erros referentes ao ano de 2005 para as cidades de Camocim e Paracuru.

### 5.5.1 Distribuição de Weibull – (Camocim - 2005)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros Anuais referentes ao ano de 2005 para a cidade a Camocim–Ce, onde se pode observar a distribuição de Weibull a partir de cada método numérico utilizado para a determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ .

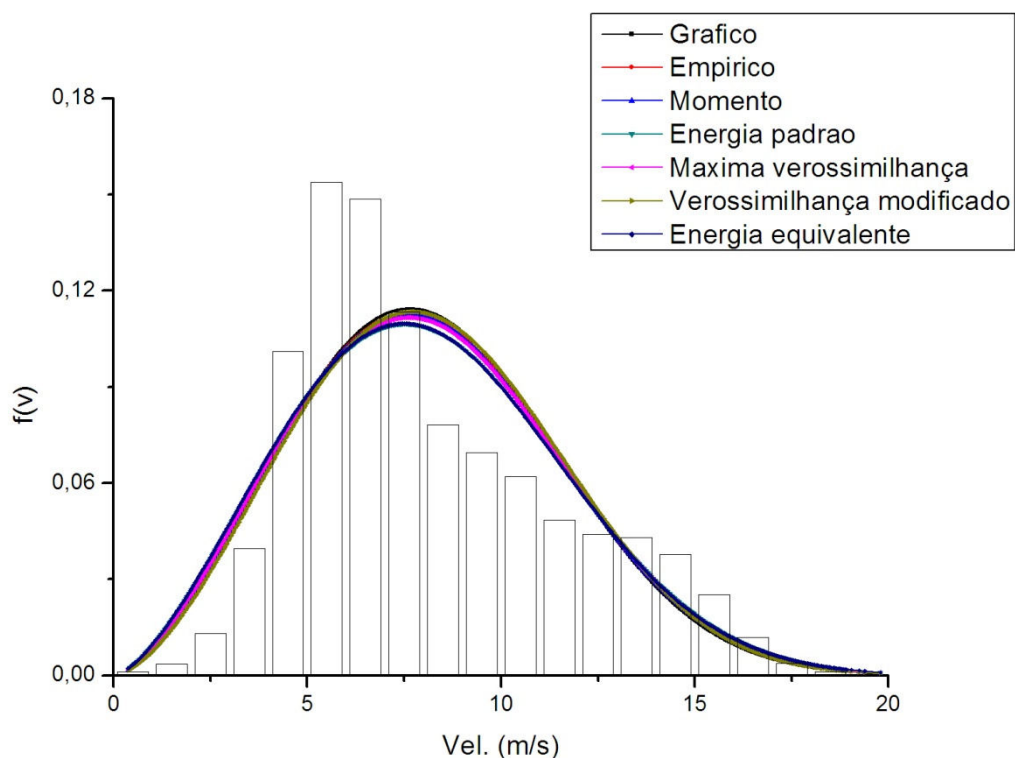


Figura 51– Distribuição de Weibull – Camocim Ano 2005

Tabela 48– Análise Estatística e Análise da Potência – Camocim Ano 2005

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,627000	9,190000	0,031910	0,001050	0,958490	3,40E-02
Empírico	2,592880	9,213000	0,031500	0,001020	0,959540	1,91E-02
Momento	2,580000	9,214330	0,031360	0,001010	0,959900	1,58E-02
Energia Padrão	2,502350	9,221870	0,030540	0,000958	0,961970	5,82E-03
Máxima Verossimilhança	2,563000	9,230000	0,031150	0,000997	0,960430	6,72E-03
Verossimilhança Modificado	2,630000	9,275000	0,031810	0,001040	0,958740	7,58E-03
Energia Equivalente	2,501000	9,202960	0,030560	0,000959	0,961920	7,11E-07

### 5.5.2 Distribuição de Weibull – (Paracuru - 2005)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros anuais referentes ao ano de 2005 para a cidade a Camocim–Ce, onde se pode observar a distribuição de Weibull a partir de cada método numérico utilizado para determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ .

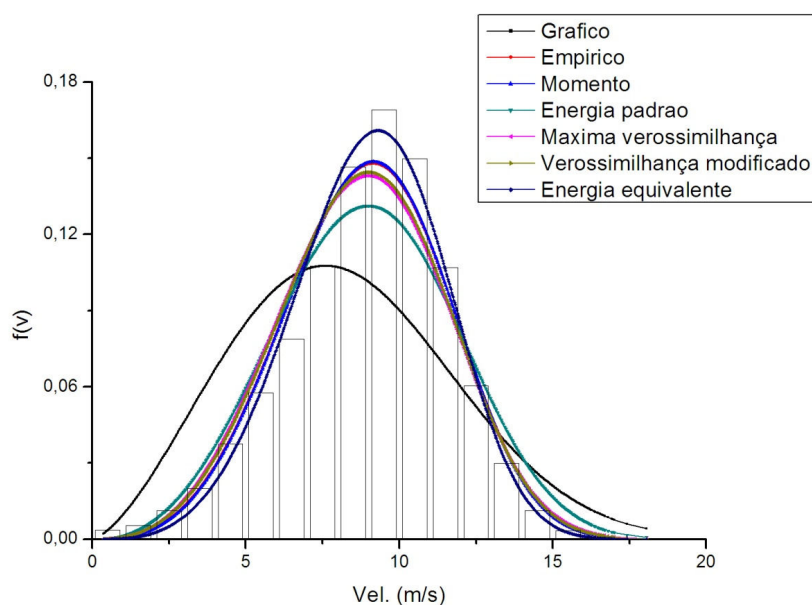


Figura 52– Distribuição de Weibull – Paracuru Ano 2005

Tabela 49 – Análise Estatística e Análise da Potência – Paracuru Ano 2005

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	2,488000	9,348000	0,033200	0,001130	0,962790	1,32E-02
<i>Empírico</i>	3,832150	9,897950	0,037250	0,001420	0,953160	8,71E-03
<i>Momento</i>	3,852000	9,895090	0,037410	0,001440	0,952760	6,73E-03
<i>Energia Padrão</i>	3,388210	9,963980	0,033980	0,001190	0,961020	6,22E-02
<i>Máxima Verossimilhança</i>	3,658000	9,800000	0,036470	0,001370	0,955110	1,05E-02
<i>Verossimilhança Modificado</i>	3,701000	9,813000	0,036710	0,001380	0,954520	9,31E-03
<i>Energia Equivalente</i>	4,210000	9,926330	0,040010	0,001640	0,945960	3,62E-07

## 5.6 Curvas e Tabelas Anuais – 2006

A seguir são mostradas as curvas com a distribuição de Weibull em base anual, além das tabelas com a determinação dos respectivos erros referentes ao ano de 2005 para as cidades de Camocim e Paracuru.

### 5.6.1 Distribuição de Weibull – (Camocim - 2006)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros anuais referentes ao ano de 2006 para a cidade a Camocim–Ce, onde se pode observar a distribuição de Weibull a partir de cada método numérico utilizado para a determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ .

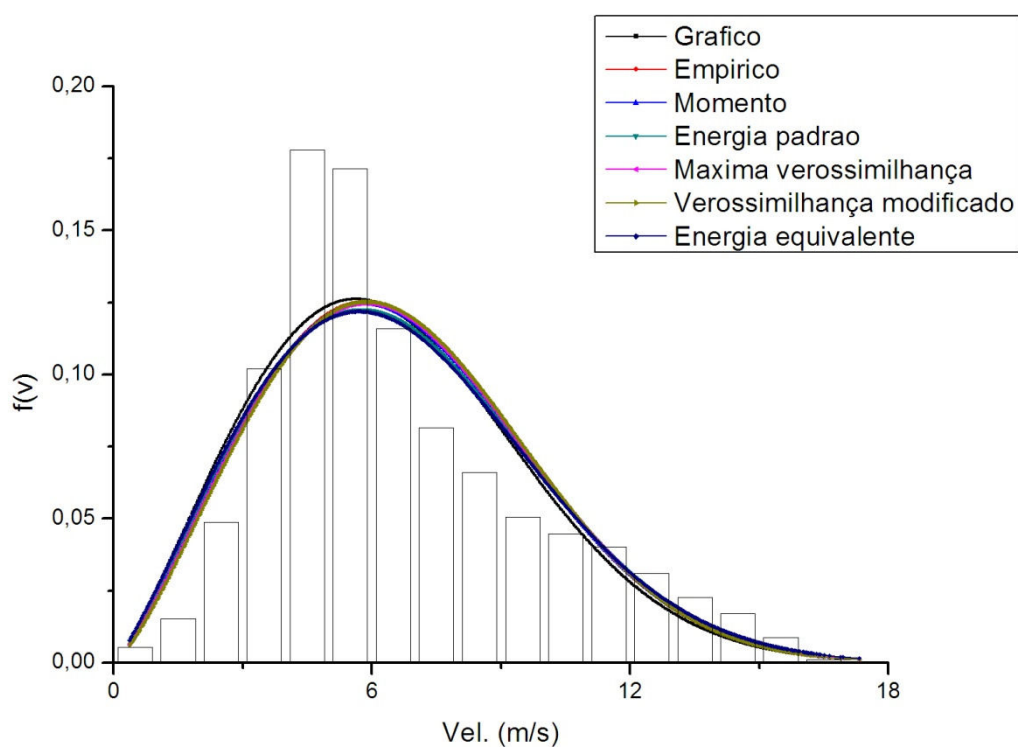


Figura 53– Distribuição de Weibull – Camocim Ano 2006

Tabela 50 – Análise Estatística e Análise da Potência – Camocim Ano 2006

Métodos Numéricos	Parâmetros Weibull		Testes Estatísticos			Análise de Potência
	K	C	RMSE	$\chi^2$	$R^2$	Erro da Potência - EP
Gráfico	2,236000	7,346000	0,034970	0,001260	0,955490	7,95E-02
Empírico	2,288630	7,530060	0,035000	0,001260	0,955410	2,72E-02
Momento	2,270000	7,530670	0,034790	0,001250	0,955930	2,06E-02
Energia Padrão	2,223790	7,531780	0,034300	0,001210	0,957180	3,31E-03
Máxima Verossimilhança	2,283000	7,550000	0,034890	0,001250	0,955690	1,75E-02
Verossimilhança Modificado	2,300100	7,562000	0,035050	0,001260	0,955280	1,86E-02
Energia Equivalente	2,200000	7,517050	0,034090	0,001200	0,957690	7,45E-08

### 5.6.2 Distribuição de Weibull – (Paracuru - 2006)

Nesta seção são mostradas as curvas e tabelas com erros anuais referentes ao ano de 2006 para a cidade a Paracuru–Ce, onde se pode observar a distribuição de Weibull a partir de cada método numérico utilizado para determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ .

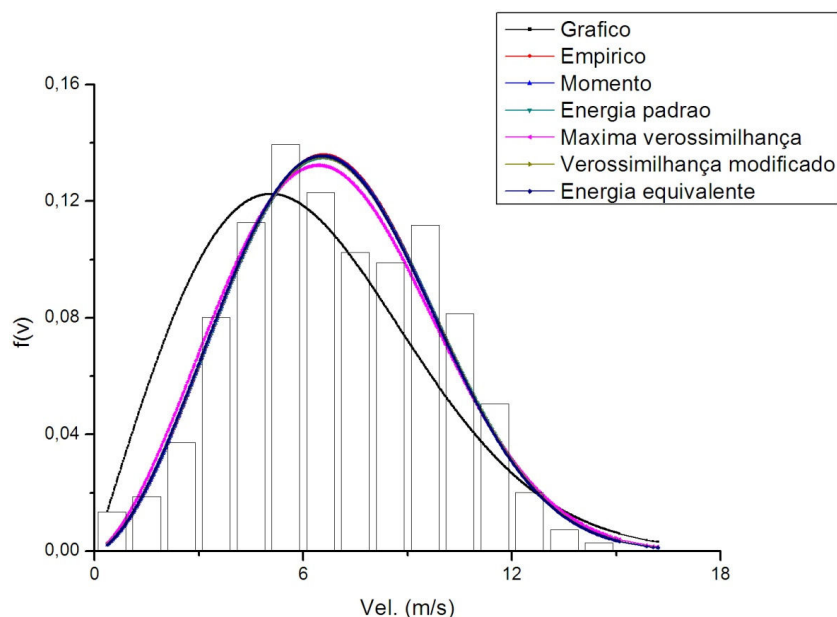


Figura 54– Distribuição de Weibull – Paracuru Ano 2006

Tabela 51 – Análise Estatística e Análise da Potência – Paracuru Ano 2006

<b>Métodos Numéricos</b>	<b>Parâmetros Weibull</b>		<b>Testes Estatísticos</b>			<b>Análise de Potência</b>
	<b>K</b>	<b>C</b>	<b>RMSE</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Erro da Potência - EP</b>
<i>Gráfico</i>	2,033000	7,083000	0,038970	0,001560	0,921840	8,51E-02
<i>Empírico</i>	2,676020	7,850060	0,040060	0,001650	0,917410	7,65E-03
<i>Momento</i>	2,665000	7,851130	0,039920	0,001640	0,917980	1,04E-02
<i>Energia Padrão</i>	2,654380	7,852140	0,039790	0,001630	0,918510	1,31E-02
<i>Máxima Verossimilhança</i>	2,564000	7,790000	0,039090	0,001570	0,921380	9,73E-03
<i>Verossimilhança Modificado</i>	2,649000	7,830000	0,039850	0,001630	0,918290	5,69E-03
<i>Energia Equivalente</i>	2,653000	7,817450	0,039960	0,001640	0,917810	1,15E-06

## 5.7 Comentários dos Resultados

### 5.7.1 Análise estatística

Graficamente se observa que os métodos que utilizam iterações numéricas (Momento, Máxima verossimilhança, Máxima verossimilhança modificado e Energia equivalente), para se determinar os parâmetros de forma  $k$  e os parâmetros de escala  $c$  da distribuição de Weibull, possuem um melhor ajuste da curva com o histograma de velocidade, sendo observado que o método numérico da Energia equivalente é o método que tem o melhor ajuste de curva, sendo isto comprovado com a determinação dos testes estatísticos,  $RMSE$ ,  $EF$ ,  $X^2$ , além da análise do erro da potência ( $EP$ ), conforme tabelas apresentadas com testes estatísticos e erros da potência em base mensal principalmente e base anual.

Observa-se a partir da análise estatística que os valores de  $RMSE$ ,  $X^2$  e  $R^2$ , possuem magnitudes bem próximas para todos os métodos numéricos utilizados, porém tem-se um grande diferencial na análise do erro da potência, onde se observa uma maior relevância quando se utiliza o método numérico da Energia equivalente para o ajuste da curva de distribuição de Weibull. Em

alguns casos verifica-se também que mesmo com valores bem próximos dos outros métodos numéricos, o método da energia equivalente também possui maior eficiência do método ( $EF$  ou  $R^2$ ), com valores entre de 96-97% para as cidades de Camocim e Paracuru-Ce. Estes resultados acontecem devido a uma maior precisão da determinação dos valores dos parâmetros  $k$  e  $c$ , quando se utiliza o método da energia equivalente para a determinação destes parâmetros de Weibull.

Também é verificado na maioria das tabelas com erros mensais que o método numérico da energia equivalente satisfaz o teste do  $X^2$  e  $RMSE$ , possuindo valores abaixo dos determinados através dos demais métodos numéricos utilizados, chegando a valores bem próximos de zero.

### **5.7.2 Análise do erro da potência**

Já nos testes com erro da potência fica evidente que o método da energia equivalente é bem mais eficiente do que os demais métodos, tendo valores de  $EP$  em torno de  $10^{-7}$ , enquanto que, nos demais métodos se têm erros em torno de  $10^{-2}$  e  $10^{-3}$ , para os períodos e localidades analisadas.

Estes resultados já eram esperados, visto que o método da energia equivalente é o método mais adequado para ser utilizado nas condições de velocidade de vento da região nordeste do Brasil, conforme Silva (2003).

### **5.7.3 Análise dos valores dos parâmetros $k$ e $c$**

Com relação ao parâmetro  $k$ , observa-se que os valores de  $k$  variam entre 2-3 para a cidade de Camocim, mostrando uma menor constância da velocidade do vento para esta localidade, enquanto que na cidade de Paracuru se tem valores de  $k$  chegando a níveis entre 6-8, ou seja, com uma maior constância da velocidade do vento para esta cidade analisada.

Os valores de  $c$ , tanto para a cidade de Camocim como para a cidade de Paracuru varia entre 6-11, isto é referente aos valores de velocidade média do vento que ocorre nestas cidades.



## 6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados nesta dissertação, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

1. O método numérico da Energia Equivalente é o método de maior eficiência na determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$  para ajuste da curva de distribuição de Weibull, para os dados de velocidade do vento do litoral do estado do Ceará, a partir dos dados analisados das cidades de Camocim e Paracuru-Ce, tanto através dos testes estatísticos como através dos testes físicos (erro da potência);
2. O método numérico da Energia Padrão e o método numérico Gráfico são os métodos de menor eficácia tanto no sentido estatístico como no teste do erro da potência para ajuste da curva de distribuição de Weibull, para os dados de velocidade do vento do litoral do estado do Ceará, a partir dos dados analisados das cidades de Camocim e Paracuru-Ce;
3. O erro da potência é a forma mais adequada para se analisar os erros de ajuste da distribuição de Weibull, pois esta análise além de dar uma boa comparação com os demais métodos numéricos utilizados para ajuste da curva, também pode justificar o interesse comercial na instalação de parques eólicos nas regiões em estudo;
4. Os métodos numéricos que utilizam iterações matemáticas na determinação dos parâmetros  $k$  e  $c$ , possuem erros menores no ajuste das curvas de distribuição, sendo portanto recomendados para utilização quando se deseja ter maior precisão nos resultados obtidos com a distribuição de Weibull a partir de dados da velocidade de vento;
5. Observa-se uma maior tendência na eficiência do ajuste da curva com o histograma de velocidade, quando se tem um menor desvio padrão dos dados de velocidade do vento.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKDAG, SEYIT A.; DINLER, ALI, **A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications**, Energy Conversion and Management, 50, p. 1761–1766, 2009.

AKPINAR, E. KAVAK; AKPINAR, S., **Determination of the wind energy potential for Maden-Elazig**, Energy Conversion and Management, 45, p. 2901–2914, 2004.

CHANG, TIAN PAU, **Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application**, Applied Energy, 88, p. 272–282 , 2011.

CELIK, ALI NACI, **A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey**, Renewable Energy, 29,p. 593–604, 2003

CIEMAT. **Principios de la conversion de la energia eólica**. Madri, 2 Ed. 2002.

DEAVES, D.M; LINES, I.G, **On the fitting of low mean wind speed data to the Weibull distribution**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 66, p.169-178, 1997.

DORVLO, ATSU S.S, **Estimating wind speed distribution**, Energy Conversion and Management ,43, p. 2311–2318, 2002.

GHOSH, AMITAVA, **A FORTRAN program for fitting Weibull distribution and generating samples**, Computers & Geosciences, 25, p. 729-738, 1999.

JUSTUS, C.G; MIKHAIL, A., **Height variation of wind speed and wind distribution statistics**, ERDA ORO / 5108.76 / 4C60, 1976

MCCLAVE, JAMES T.; DIETRICH, FRANK H., **Statistics**, Second Edition, University of Florida, 1982.

SILVA.G.R, **Características de Vento da Região Nordeste, Análise, Modelagem e Aplicações para Projetos de Centrais eólicas**, Dissertação de mestrado, Recife PE, 2003.

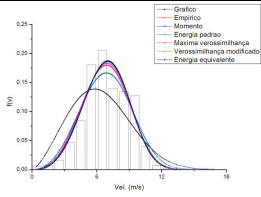
STEVENS, M.J; SMULDERS, P.T., **The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes**. Wind Engineering, 3, p. 132-145, 1979.

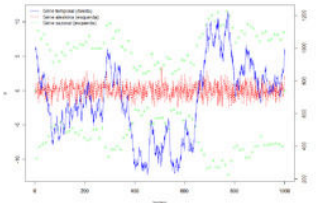
ZHOU, WEI; YANG, HONGXING; FANG, ZHAOHONG, **Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China**. Renewable Energy ,31, p. 739–753, 2005.

ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO DO ESTADO DO CEARÁ, SEINFRA-CE 2008.

## ANEXO 1

### CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Item	Definição	Relação Matemática
Coeficiente de Variação	É a razão entre o desvio padrão e a média aritmética, apresentada em forma de %	$\frac{100 * \sigma}{M}$
Correlação	É usada para determinar se há relacionamento entre 2 variáveis.	-
Desvio Padrão	Um valor que quantifica a dispersão dos eventos sob distribuição normal, ou seja, a média das diferenças entre o valor de cada evento e a média central. Quanto maior o desvio padrão, maior a dispersão e mais afastados da média estarão os eventos extremos.	$\sqrt{\frac{\sum(x - m)^2}{n - 1}}$
Freqüência Relativa	A freqüência relativa de uma classe é a freqüência desta classe dividida por todas as freqüências das classes	-
Freqüência Cumulativa	É o gráfico de freqüências de ocorrências, por classe, apresentado de forma cumulativa.	-
Histogramas	São gráficos em barras que apresentam a dispersão dos dados ao longo da faixa de existência.	
Média Aritmética	É o resultado da divisão da soma de todos os valores de um conjunto de dados pelo o número de dados.	$\frac{\sum x_i}{n}$
Média Geométrica	É o resultado da raiz e-nésima do produto de todos os valores dados	$\sqrt[n]{x_1 * x_2 \dots * x_n}$

Média Harmônica	É o recíproco da média aritmética dos recíprocos de todos os valores dados	$\left(\frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2} + \dots + \frac{1}{x_n}}\right)/(n)$
Média Ponderada	Leva em conta o quanto cada valor é mais confiável ou mais freqüente no conjunto de dados	$\frac{x_1 * f_1 + x_2 * f_2 + \dots + x_n * f_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n}$
Mediana	É o valor que se encontra na posição média da série ordenada de dados, para uma série ordenada par é determinada através da média aritmética dois valores de posição média da série.	-
Moda	É o valor de maior freqüência de aparecimento de uma série de dados	-
Medidas de Dispersão	Trata-se da medida de variação ou distribuição dos dados	-
Regressão Linear	A regressão é usada basicamente com duas finalidades: de previsão (prever o valor de y a partir do valor de x) e estimar o quanto x influencia ou modifica y.	$y = ax + b$
Séries Temporais	Uma série temporal é uma coleção de observações feitas seqüencialmente ao longo do tempo	
Método dos mínimos quadrados	É uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajustamento para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados	-

Variância	É a média aritmética dos quadrados dos desvios de todos os valores da série sobre a média aritmética da população.	$\frac{\sum(x - m)^2}{n - 1}$ <p>Onde <math>x</math> representa os itens da série, <math>m</math> é a média arit. e <math>n</math> é o num. obs.</p>
Variável aleatória discreta	Variável aleatória enumerável, por exemplo, a quantidade de microorganismos em um copo de leite ou em rio.	-
Variável aleatória contínua	Variável aleatória é aquela que assume valores reais dentro de um conjunto contínuo, exemplos: Altura, Temperatura etc.	-
Variável aleatória	Variável que pode receber uma série de valores através de uma certa probabilidade.	$v = c \{ \ln [1 / (1 - Rn)] \}^{1/k}$ <p>Onde <math>Rn</math> é a variável</p>